

УДК 621.315.592

Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник

Обзор

© Т.В. Бланк[¶], Ю.А. ГольдбергФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 29 января 2007 г. Принята к печати 2 апреля 2007 г.)

Приведен обзор литературных данных по свойствам омических контактов металл–полупроводник и механизмам протекания тока в них (термоэлектронная эмиссия, полевая эмиссия, термополевая эмиссия, а также протекание тока по металлическим шунтам). Теоретические зависимости сопротивления омического контакта от температуры и концентрации носителей заряда в полупроводнике сравнивались с экспериментальными данными для омических контактов к полупроводникам типа $A^{II}B^{VI}$ (ZnSe, ZnO), $A^{III}B^V$ (GaN, AlN, InN, GaAs, GaP, InP), A^{IV} (SiC, алмаз) и твердым растворам этих полупроводников. В омических контактах на основе слабо легированных полупроводников основным механизмом протекания тока является термоэлектронная эмиссия, причем высота потенциального барьера металл–полупроводник составляет чаще всего 0.1–0.2 эВ. В омических контактах на основе сильно легированных полупроводников протекание тока осуществляется за счет полевой эмиссии, а высота потенциального барьера металл–полупроводник равна примерно 0.3–0.5 эВ. В сплавных In-контактах к GaP и GaN проявляется механизм протекания тока, не характерный для диодов Шоттки, — протекание тока по металлическим шунтам, образованным за счет осаждения атомов металла на дислокациях или других несовершенствах в полупроводнике.

PACS: 73.30.+y, 73.40.Cg, 81.40.Ef

1. Краткая историческая справка

Омический контакт — это контакт металл–полупроводник, в котором не проявляется потенциальный барьер на границе раздела; он является неотъемлемой частью любого полупроводникового прибора. Исследования омических контактов начались ~ 60 лет назад, когда было замечено, что на границе Ni–CdS существует потенциальный барьер, а на границе Al–CdS его нет, и Шоттки [1] предположил, что барьер не образуется, когда работа выхода электрона из металла Φ_m меньше энергии сродства к электрону полупроводника χ_s . В 40–50-х годах XX века, когда получили развитие полупроводники $A^{III}B^V$, Бардин [2] указал, что наличие барьера часто обусловлено не работой выхода электрона из металла, а плотностью и энергетическим распределением поверхностных состояний полупроводника, которые, по мнению Спайсера [3], образуются из-за наличия на поверхности полупроводника посторонних атомов, например атомов кислорода. Ранний этап исследования омических контактов рассмотрен в обзоре [4].

Дальнейшие исследования проводились в трех направлениях.

Во-первых, проводились технологические работы с целью снижения сопротивления омических контактов до такой степени, чтобы они не проявлялись в свойствах полупроводниковых приборов. Величины сопротивления омических контактов, приведенные к единице площади, достигли $R_c = 10^{-6} - 10^{-8}$ Ом · см². Это осуществлялось либо за счет изменения химического состава прикон-

тактной области полупроводника, либо за счет дополнительного легирования.

Во-вторых, изучался состав фаз, образующихся на границе металл–полупроводник, методом рентгеноспектрального анализа, химического анализа, спектроскопии, туннельной микроскопии. На основании этих исследований был определен оптимальный химический состав приконтактной области полупроводника, обеспечивающий минимальное сопротивление контакта.

В-третьих, были разработаны методы определения сопротивления омического контакта, которое часто составляет малую часть общего сопротивления структуры. Сопротивление омических контактов определялось из зависимости разности потенциалов между несколькими контактами от расстояния между ними [5]; из зависимости сопротивления структуры металл–полупроводник–металл с двумя омическими контактами от толщины структуры [6]; из анализа характеристик контактов различного диаметра [7], а также методом линии передачи [8].

Этот этап развития омических контактов отражен в общих обзорах [6,9–13], а также в обзорах по конкретным полупроводникам: ZnO [14], ZnS [15], GaAs, GaN, ZnSe [16], SiC [17], C (алмаз) [18].

С середины 90-х годов XX века начинаются исследования зависимости сопротивления омических контактов от температуры, концентрации носителей заряда, ширины запрещенной зоны полупроводника и так далее с целью установить механизм протекания тока через омический контакт. Теоретически рассматривались как традиционные для барьеров Шоттки механизмы протекания тока (термоэлектронная эмиссия, термополевая эмиссия,

[¶] E-mail: tblank@mail.ioffe.ru

полевая эмиссия), так и другие механизмы (рекомбинация, металлические шунты). Механизм протекания тока определялся из сравнения экспериментальных результатов с этими теориями. Эти исследования выполнялись как для полупроводников $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{IV}$, так и для твердых растворов на их основе. Систематизации этих исследований посвящен обзор.

2. Образование омического контакта

Как известно, контакт металл–полупроводник может быть либо выпрямляющим (барьерным), если потенциальный барьер между металлом и полупроводником туннельно-непрозрачный; либо омическим, если потенциальный барьер отсутствует или он туннельно-прозрачен для электронов.

Омический контакт обычно образуется в случаях, когда:

— потенциальный барьер между металлом и полупроводником отсутствует; например, если для полупроводника n -типа с низкой плотностью поверхностных

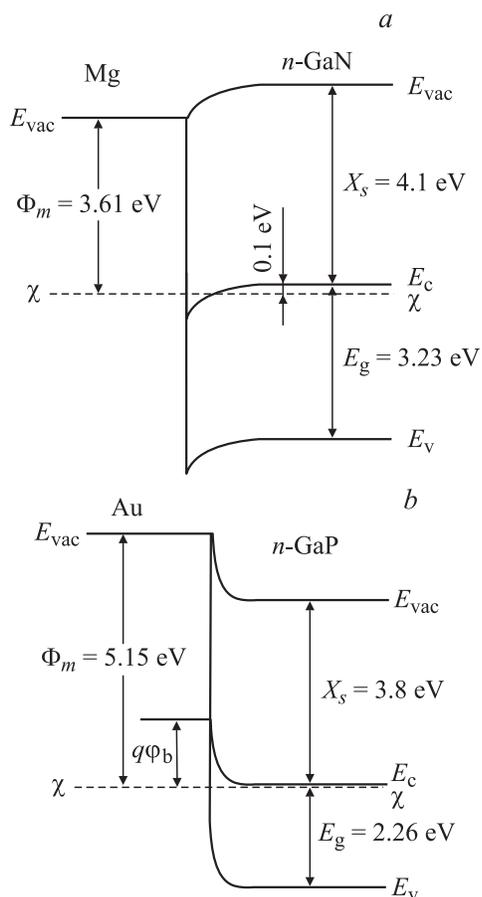


Рис. 1. Энергетические диаграммы омических контактов к полупроводникам n -типа: a — полупроводник не имеет поверхностных состояний и $\Phi_m < X_s$ (на примере Mg– n -GaN); b — полупроводник содержит поверхностные состояния большой плотности в запрещенной зоне (на примере Au– n -GaP), но приповерхностная область сильно легирована. E_{vac} — уровень вакуума, χ — уровень Ферми.

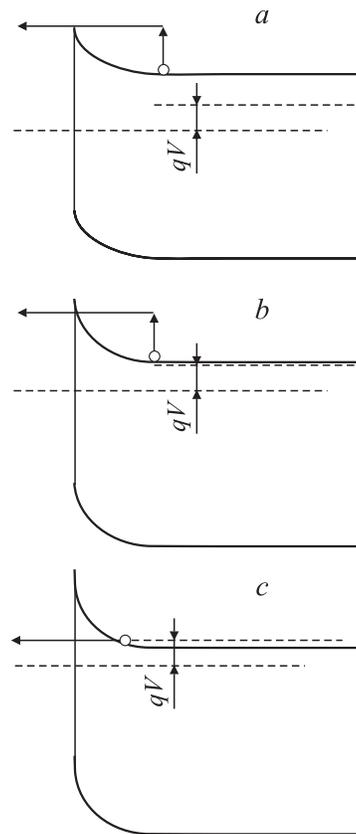


Рис. 2. Механизмы протекания тока в омическом контакте металл–полупроводник: a — термоэлектронная эмиссия электронов над барьером; b — термополевая эмиссия электронов сквозь вершину барьера; c — туннелирование (полевая эмиссия) электронов сквозь барьер.

состояний в запрещенной зоне выбран металл с работой выхода электронов, меньшей, чем сродство к электрону полупроводника (рис. 1, a);

— потенциальный барьер присутствует, но он узкий (туннельно-прозрачный), что достигается сильным легированием приповерхностной области полупроводника (рис. 1, b и 2, c); при этом электроны переходят границу раздела сквозь барьер по всей его высоте (полевая эмиссия);

— потенциальный барьер присутствует, но он низкий, в результате чего он легко преодолевается носителями заряда. Такая ситуация что обычно достигается изменением химического состава полупроводника вблизи контакта, например, созданием узкозонного приконтактного слоя; в этом случае электроны переходят границу раздела над барьером (термоэлектронная эмиссия) (рис. 2, a).

Возможна также комбинация двух последних механизмов, когда электроны переходят сквозь вершину барьера (рис. 2, b) — термополевая эмиссия.

В последнее время были рассмотрены механизмы, при которых потенциальный барьер металл–полупроводник присутствует, но

— слой объемного заряда закорочен металлическими шунтами, образовавшимися, например, за счет осажде-

ния атомов металлов на дислокациях и других несовершенствах полупроводника (этот механизм характерен для сплавных омических контактов);

— из-за большого количества дефектов кристаллической решетки вблизи контакта время жизни носителей заряда исключительно мало, и омический контакт образуется за счет рекомбинации носителей заряда (этот механизм проявляется редко).

3. Сопротивление омического контакта

Основной характеристикой омического контакта является его сопротивление, приведенное к единице площади. Оно состоит из последовательно соединенных сопротивлений:

- сопротивления приконтактной области полупроводника,
- сопротивления, связанного с прохождением электронами потенциального барьера.

3.1. Сопротивление приконтактной области

Сопротивление приконтактной области — это сопротивление сильно легированной области и сопротивление переходов $n-n^+$ и $p-p^+$. Сопротивление сильно легированной приконтактной области обычно мало в полупроводниках с высокой подвижностью носителей заряда. Например, сопротивление приконтактного слоя n^+ -GaAs толщиной ~ 1 мкм при концентрации электронов $n^+ \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и подвижности $\sim 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ составляет около $6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. В то же время в таких полупроводниках, как SiC и $\text{Al}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, часто не удается достичь сильного легирования приконтактной области, и, кроме того, подвижность носителей заряда невелика ($10-100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). В этом случае сопротивление приконтактной области может достигать $\sim 10^{-4}-10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Сопротивление переходов $n-n^+$, $p-p^+$ рассмотрим на примере n^+-n -перехода. Оно обратно пропорционально концентрации электронов [19,20]:

$$R_{n-n^+} \approx \frac{L_D N_c}{q \mu_n K N N^+}, \quad (1)$$

где L_D — дебаевская длина в n -области, N_c — плотность состояний в зоне проводимости полупроводника, μ_n — подвижность электронов в n -области, N и N^+ — концентрация электронов в n - и n^+ -областях, K — коэффициент, показывающий во сколько раз концентрация электронов на уровне Ферми в n^+ -области превосходит N , q — заряд электрона. Для омического контакта к GaAs R_{n-n^+} дает основной вклад в сопротивление контакта при $N < 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

В работе [21] было показано, что $n-n^+$ -переход можно рассматривать как диод Шоттки без потенциального барьера с термоэмиссионным механизмом протекания

Таблица 1. Расчетное приведенное сопротивление $n-n^+$ -перехода согласно модели, предложенной в [21]

$N, \text{ см}^{-3}$	$R_{n-n^+}, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$			
	GaAs	InP	GaP	GaN
10^{16}	10^{-6}	$1.8 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-6}$
10^{17}	10^{-7}	$1.8 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$4 \cdot 10^{-7}$
10^{18}	10^{-8}	$1.8 \cdot 10^{-8}$	10^{-7}	$4 \cdot 10^{-8}$

тока, и его сопротивление определяется формулой

$$R_{n-n^+} = \left(\frac{k}{qA^*T} \right) \frac{1}{\ln[1 + \exp(\chi/kT)]}, \quad (2)$$

где χ — энергия уровня Ферми, $A^* = 4\pi q m^* k^2 \hbar^{-3} = 120 m_r A/(\text{см}^2 \text{К}^2)$ — эффективная постоянная Ричардсона, m_r — относительная эффективная масса основных носителей заряда $m_r = m^*/m_0$, m_0 — масса свободного электрона, k — постоянная Больцмана. Если в слабо легированном полупроводнике $\chi \gg kT/q$, то

$$R_{n-n^+} = \left(\frac{kN_c}{qA^*TN} \right). \quad (3)$$

Оценки сопротивления $n-n^+$ -перехода для наиболее употребительных полупроводников $\text{Al}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ показаны в табл. 1; расчет выполнен в предположении, что различие концентраций электронов в n - и n^+ -областях составляет по крайней мере 2 порядка величины.

3.2. Сопротивление, связанное с переходом границы металл–полупроводник

Переход электронами границы раздела металл–полупроводник может происходить:

- над барьером (термоэлектронная эмиссия, рис. 2, а);
- сквозь вершину барьера (термополевая эмиссия, рис. 2, б);
- сквозь барьер на уровне энергии Ферми (туннелирование, полевая эмиссия, рис. 2, в).

Для определения условий, при которых проявляется тот или иной механизм протекания тока, Падовани и Страттон [22] ввели параметр E_{00} , зависящий от природы полупроводника и степени его легирования. Для случая полупроводника n -типа

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}}, \quad (4)$$

где ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; N_d — концентрация ионизованных доноров в полупроводнике.

Для случая полупроводника p -типа N_d заменяется на N_a — концентрацию ионизованных акцепторов в полупроводнике.

Расчеты, выполненные в работе [10], показывают, что при высоких температурах ($kT \gg E_{00}$) основным механизмом протекания тока является термоэлектронная эмиссия; при средних температурах ($kT \approx E_{00}$) — термополевая эмиссия; при низких температурах ($kT \ll E_{00}$) — полевая (туннельная) эмиссия.

3.2.1. Термоэлектронная эмиссия. Рассмотрим теорию термоэлектронной эмиссии на примере полупроводников n -типа; все выводы будут справедливы и для полупроводников p -типа с заменой концентрации ионизованных доноров на концентрацию ионизованных акцепторов, а плотность состояний в зоне проводимости на плотность состояний в валентной зоне.

Зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии J от напряжения V и температуры T имеет вид [10]

$$J = J_s \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right), \quad (5)$$

где

$$I_s = J_s S = A^* S T^2 \exp\left[\frac{-q(\phi_b - \Delta\phi_b)}{kT}\right]. \quad (6)$$

Здесь I_s — ток насыщения, n — коэффициент идеальности вольт-амперной характеристики, ϕ_b — высота потенциального барьера, $\Delta\phi_b$ — уменьшение высоты потенциального барьера силами зеркального изображения и другими причинами; S — площадь контакта. Приведенное к единице площади сопротивление контакта, равное

$$R_c = \frac{dV}{dJ_s} = \frac{dV}{dI} S, \quad (7)$$

при $V \rightarrow 0$ составляет

$$R_c = \left(\frac{k}{qA^*T}\right) \exp\left[\frac{-q(\phi_b - \Delta\phi_b)}{kT}\right], \quad (8)$$

причем в случае понижения барьера только силами зеркального изображения величина $\Delta\phi_b$ равна

$$\Delta\phi_b = \left[\frac{2\pi q^7 N_d}{(\epsilon_s \epsilon_0)^3} \left(V_d - V - \frac{kT}{q}\right)\right]^{1/4}, \quad (9)$$

где V_d — диффузионная (контактная) разность потенциалов, V — приложенное напряжение.

Таким образом, если протекание тока через омический контакт определяется термоэлектронной эмиссией, то — сопротивление контакта экспоненциально возрастает с ростом высоты потенциального барьера ϕ_b ;

— сопротивление контакта уменьшается с ростом температуры, и зависимость $R_c T = f(1/T)$ в полулогарифмическом масштабе должна быть линейной, причем ее наклон пропорционален высоте барьера ϕ_b , а отсечка при $1/T \rightarrow 0$ пропорциональна A^* ;

— сопротивление контакта зависит от типа полупроводника и слабо уменьшается с ростом уровня легирования ($\Delta\phi_b \propto N_d^{1/4}$).

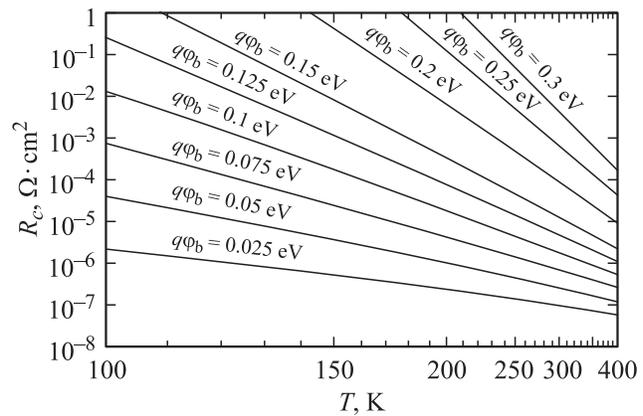


Рис. 3. Расчетные температурные зависимости сопротивления омического контакта R_c к GaAs при различных значениях высоты потенциального барьера металл–полупроводник ϕ_b в случае протекания тока согласно теории термоэлектронной эмиссии.

Для снижения сопротивления омического контакта в таких контактах уменьшают высоту потенциального барьера металл–полупроводник за счет изменения химического состава полупроводника в приповерхностной области полупроводника.

Например, высоту потенциального барьера можно снизить за счет создания приповерхностного узкозонного слоя, поскольку обычно высота потенциального барьера уменьшается с уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника.

В частности, в процессе термообработки контактов (W/Ni + In/Ni)–GaAs при $T \approx 300^\circ\text{C}$ никель взаимодействует с GaAs, образуя Ni_2GaAs , и атомы Ni перемещаются с W и Ni_2GaAs [23]. При 700°C на границе Ni_2GaAs –GaAs появляется фаза $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ и островки NiAs, а при 900°C образуется слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ почти на 90% поверхности GaAs. Этот материал имеет существенно меньшую высоту барьера с металлом, чем GaAs, поскольку уровень Ферми в n -InAs закреплен в зоне проводимости, а не в запрещенной зоне.

В контактах Pd/In– n -GaP при нагреве до 600°C образуется твердый раствор $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, существенно уменьшающий высоту потенциального барьера с Pd [24] по сравнению с высотой барьера Pd– n -GaP.

Теоретические зависимости сопротивления омического контакта от высоты потенциального барьера металл–полупроводник в случае термоэлектронного протекания тока показаны на рис. 3.

Минимальное возможное значение сопротивления такого омического контакта составляет [25]

$$R_c^{\min} = \frac{k}{qA^*T} \frac{1}{\ln[1 + \exp(-\chi/kT)]}. \quad (10)$$

Здесь энергия уровня Ферми χ отсчитывается от края зоны проводимости и для невырожденного полупровод-

ника n -типа, когда $\chi \gg kT/q$, равна

$$R_c^{\min} = \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{\chi}{kT}\right) = \frac{k}{qA^*T} \frac{N_c}{N_d} = \frac{\sqrt{2\pi m^* kT}}{qN_d}. \quad (11)$$

В случае GaAs [26] минимально возможное сопротивление контакта составляет

$$R_c^{\min} [\text{Ом} \cdot \text{см}^2] = 1.55 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{T}{300}} \frac{10^{15}}{N_d}. \quad (12)$$

Для $N_d \approx 10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, когда туннелирование несущественно, при $T = 300 \text{ К}$ можно создавать омические контакты к GaAs с сопротивлением $R_c^{\min} = 2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

3.2.2. Полевая эмиссия. Туннельная теория (теория полевой эмиссии) [10] предполагает, что сопротивление омического контакта металл–полупроводник, приведенное к единице площади, составляет

$$\frac{1}{R_c} = \frac{m^* q^2}{2\pi \hbar^3} \int_0^\infty \frac{T(E)}{\exp[(E - \chi)/kT] - 1} dE, \quad (13)$$

где $T(E)$ — вероятность прохождения носителя, имеющего энергию E , через барьер, меньший $q\phi_b$, на величину ΔE :

$$T(E) \propto \exp\left[\frac{-2(\Delta E)^{3/2}}{3E_{00}V_d^{1/2}}\right], \quad (14)$$

где E_{00} — параметр Падовани–Страттона [22], V_d — диффузионная (контактная) разность потенциалов. Согласно [27–29]

$$R_c \approx \frac{kT\sqrt{E_{00}}}{qA^*T^2\sqrt{qV_d}} \exp\left(\frac{qV_d}{E_{00}}\right) \exp\left(\frac{\chi}{kT}\right) \propto \exp\left(\frac{2\sqrt{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}}{\hbar} \frac{\phi_b}{N^{1/2}}\right). \quad (15)$$

Анализ этой формулы показывает, что если протекание тока через омический контакт определяется полевой эмиссией, то

— сопротивление контакта экспоненциально возрастает с уменьшением квадратного корня из концентрации носителей заряда (т.е. с увеличением ширины потенциального барьера);

— сопротивление контакта экспоненциально возрастает с ростом высоты потенциального барьера;

— сопротивление контакта практически не зависит от температуры.

Расчетная зависимость сопротивления омического контакта от концентрации носителей заряда и высоты потенциального барьера металл–полупроводник, когда полевая эмиссия является основным механизмом протекания тока, показана на рис. 4.

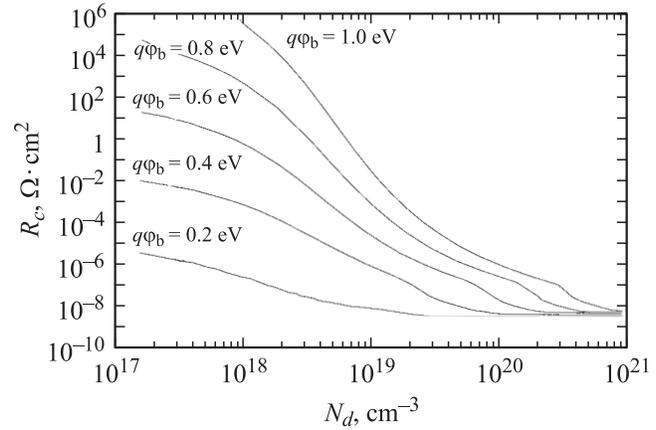


Рис. 4. Расчетная зависимость сопротивления омического контакта R_c к GaAs от концентрации нескомпенсированных доноров N_d и высоты потенциального барьера металл–полупроводник ϕ_b в случае протекания тока согласно теории полевой эмиссии [29].

3.2.3. Термополевая эмиссия. Согласно теории термополевой эмиссии [30] зависимость плотности прямого тока J от напряжения V экспоненциальная

$$J = J_s \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right), \quad (16)$$

где

$$E_0 = E_{00} \text{cth}\left(\frac{E_{00}}{kT}\right), \quad (17)$$

причем плотность тока насыщения J_s зависит от температуры следующим образом:

$$J_s = \frac{AT\sqrt{\pi E_{00}(q\phi_b - qV + \chi)}}{k \text{cth}(E_{00}/kT)} \exp\left(\frac{\chi}{kT} - \frac{\phi_b + \chi}{T_0}\right). \quad (18)$$

Анализ формулы для термополевой эмиссии показывает:

— зависимость прямого тока от напряжения экспоненциальна;

— при каждом значении температуры наклон этой зависимости в полулогарифмическом масштабе равен $1/E_0$, а эта величина при данной температуре зависит от собственных параметров полупроводника, а не от свойств барьера;

— отсечка по оси ординат зависимости тока от напряжения в полулогарифмическом масштабе дает значение тока насыщения, а зависимость

$$\frac{J_s \text{cth}(E_{00}/kT)}{T} \text{ от } \frac{1}{E_0}$$

в полулогарифмическом масштабе линейная, ее наклон соответствует высоте потенциального барьера металл–полупроводник.

Приведенное к единице площади сопротивление контакта $R_c = dV/dJ_s$, при $V \rightarrow 0$ составляет

$$R_c \propto \exp\left(\frac{\phi_b}{E_{00} \text{cth}(E_{00}/kT)}\right). \quad (19)$$

Таблица 2. Значения работы выхода электронов из металлов Φ_m и значения энергий сродства к электрону полупроводника X_s , ширины запрещенной зоны полупроводника E_g , плотности поверхностных состояний D_s для различных полупроводников [10,12,44–49]

Металл	Φ_m , эВ	Полупроводник	E_g , эВ	X_s , эВ	D_s , эВ ⁻¹ см ⁻²
Ag	4.42	ZnO	3.46		–
Al	4.18	ZnS	3.6		–
Au	5.1–5.2	ZnSe	2.7	4.09	–
Co	4.97	CdS	2.43	4.77	$1.6 \cdot 10^{13}$
Cr	4.4–4.6	AlN	6.2	0.6	–
Cu	4.59	GaN	3.39	4.1	$(1-2) \cdot 10^{11}$ (для SiO ₂ -GaN)
		(вюрцит)			
Fe	4.46	InN	0.7	–	–
In	3.97	GaAs	1.425	4.07	$12.5 \cdot 10^{13}$
Mg	3.61	InAs	0.354	4.9	–
Mo	4.21	GaP	2.26	3.8	$2.7 \cdot 10^{13}$
Ni	5.15–5.2	InP	1.344	4.38	–
Pb	4.04	GaSb	0.726	4.06	–
Pd	5.17	InSb	0.17	4.59	–
Pt	5.43–5.65	C	5.46–5.6	–	–
Sb	4.56	Si	1.12	4.05	$2.7 \cdot 10^{13}$
Sn	4.43	Ge	0.661	4.0	–
Ta	4.2	4H-SiC	3.23	4.05	$\sim 10^{13}$
Ti	3.83–4.33	6H-SiC	3.0	4.07	$\sim 10^{13}$

Таким образом, если протекание тока через омический контакт определяется термополевой эмиссией, то

— сопротивление контакта экспоненциально возрастает с ростом высоты потенциального барьера ϕ_b ;

— сопротивление контакта уменьшается с ростом температуры, но существенно слабее, чем в случае термоэлектронной эмиссии.

В работе [31] на примере несплавных омических структур Au/Ti–GaAs(2–10 нм)– n^+ -GaAs ($n^+ = 10^{20}$ см⁻³)– n -GaAs ($n = 10^{18}$ см⁻³)–GaAs рассчитано сопротивление контакта в зависимости от температуры и концентрации электронов в GaAs при учете как термополевой эмиссии, так и полевой эмиссии (рис. 5).

Отметим особый случай омического контакта к гетероструктурам с двумерным электронным газом [32], например к GaN/Al_xGa_{1-x}N. В этом случае ток, текущий из полупроводника в металл, состоит из термоэмиссионного тока, продольного туннельного тока и туннельного тока, обусловленного квантовыми ямами, причем последний ток является определяющим. Вероятность туннелирования электронов в i -подзоне с энергией E_i равна

$$T(E_i) = \exp \left[-\frac{q\phi_b - qV - (E_i - \chi)}{E_{00}} \right], \quad (20)$$

а контактное сопротивление составляет

$$R_c = \left[\frac{2qm^*kT}{\pi^2 \hbar^3} (\Sigma_1 + \Sigma_2) \right]^{-1},$$

где

$$\Sigma_1 = \sum_{E_i < \chi} \frac{E_i/E_{00}}{i+1} \left(1 + \frac{E_{00}}{2kT} \right) \exp \left[-\frac{q\phi_b - (E_i - \chi)}{E_{00}} \right],$$

$$\Sigma_2 = \sum_{E_i > \chi} \frac{E_i/E_{00}}{i+1} \ln \left(\frac{E_i + \chi}{kT} \right) \exp \left[-\frac{q\phi_b - (E_i - \chi)}{E_{00}} \right]. \quad (21)$$

В частности, контактное сопротивление структур Al/Ti/Ta– n -GaN/Al_xGa_{1-x}N с двумерным электронным газом уменьшается с температурой по закону, близкому к экспоненциальному, от величины $\sim 10^{-4}$ Ом·см² при 77 К до $\sim 10^{-6}$ Ом·см² при 300 К.

В табл. 2 представлены параметры полупроводников и металлов, используемые при расчете контактных сопротивлений.

3.2.4. Металлические шунты. В наших работах [33,34] было показано, что в сплавных омических контактах металл–полупроводник, когда в процессе термообработки происходит растворение полупроводника в металле и рекристаллизация, может проявляться еще один механизм протекания тока — по металлическим шунтам. Они представляют собой атомы металла, осажденные по линиям несовершенств, например дислокаций, и закорачивают слой объемного заряда. При этом на краях таких „иглоков“ концентрируется электрическое поле, и протекание тока осуществляется за счет полевой эмиссии.

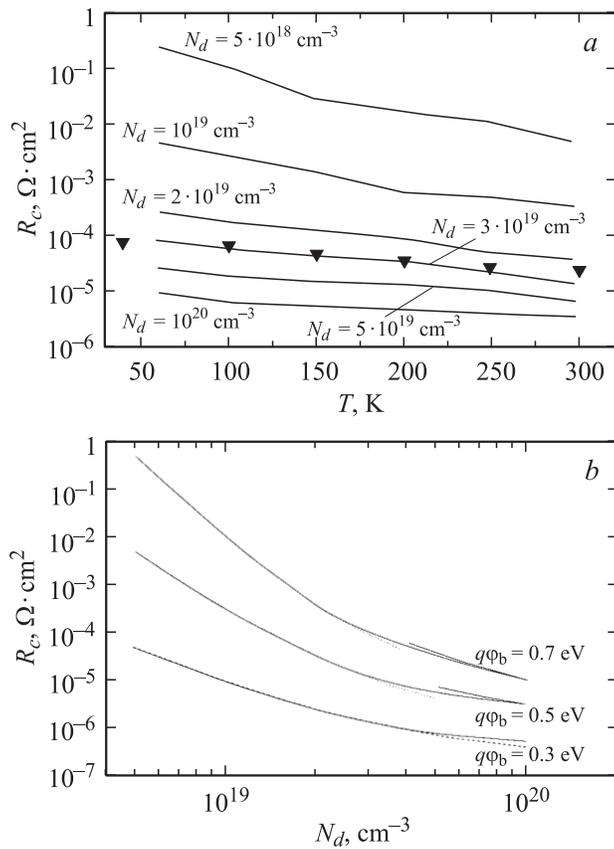


Рис. 5. Сопротивление омического контакта R_c в зависимости от температуры T при различных концентрациях некомпенсированных доноров N_d в GaAs (a) и в зависимости от концентрации N_d при различных высотах потенциального барьера металл–полупроводник ϕ_b (b) на примере несплавных омических структур Au/Ti–n-GaAs. Линии — расчетные зависимости согласно теории термополевой и полевой эмиссии, точки — экспериментальные данные [21].

Присутствие металлических шунтов в полупроводниковых приборах предполагалось и ранее: при исследовании сопротивления эпитаксиальных пленок на основе TiN [35] и при изучении механизма протекания обратного тока в диодах Шоттки Ni-GaN [36,37]. В работе [38] отмечалось, что во время термоотжига GaN-светодиодов с контактами из сплава окиси индия и олова (ИТО), индий диффундирует по дислокациям. Такие шунты из индиевых атомов наблюдались непосредственно. В работе [39] при исследовании интерфейсных реакций в омических контактах Ti/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al/GaN с помощью просвечивающего электронного микроскопа было установлено, что продуктом реакции является TiN. При этом наблюдалась корреляция между появлением островков TiN и количеством дислокаций в полупроводнике, которые действовали как короткозамкнутые диффузионные каналы.

В работах [40–42] изучались вольт-фарадные ($C-V$) и вольт-амперные ($I-V$) характеристики диодов Шоттки на основе GaAs и GaP в процессе их непрерывного нагревания, и было установлено, что барьерные контакты

In-GaAs и In-GaP переходят в омические при температурах существенно более низких, чем температуры плавления металла или эвтектик металла и полупроводника и до образования каких-либо рекристаллизованных слоев (сильно легированных, либо варизонных); при этом омический контакт сохраняется и после охлаждения структур.

Можно предположить, что в процессе нагрева происходит диффузия атомов металла, например, индия по дислокациям или другим несовершенствам и образуются металлические шунты, которые и являются причиной образования омического контакта.

В данном случае, если атомный радиус металла меньше постоянной решетки полупроводника, то сопротивление омического контакта представляет собой величину

$$R_c = \frac{(\rho_0 + \alpha T)W}{\pi r^2 P}. \quad (22)$$

Здесь ρ_0 — удельное сопротивление металла при $T \rightarrow 0$ К, α — температурный коэффициент удельного сопротивления, W — ширина слоя объемного заряда, r — атомный радиус металла, P — плотность дислокаций или других несовершенств, на которые могут осаждаться атомы металла.

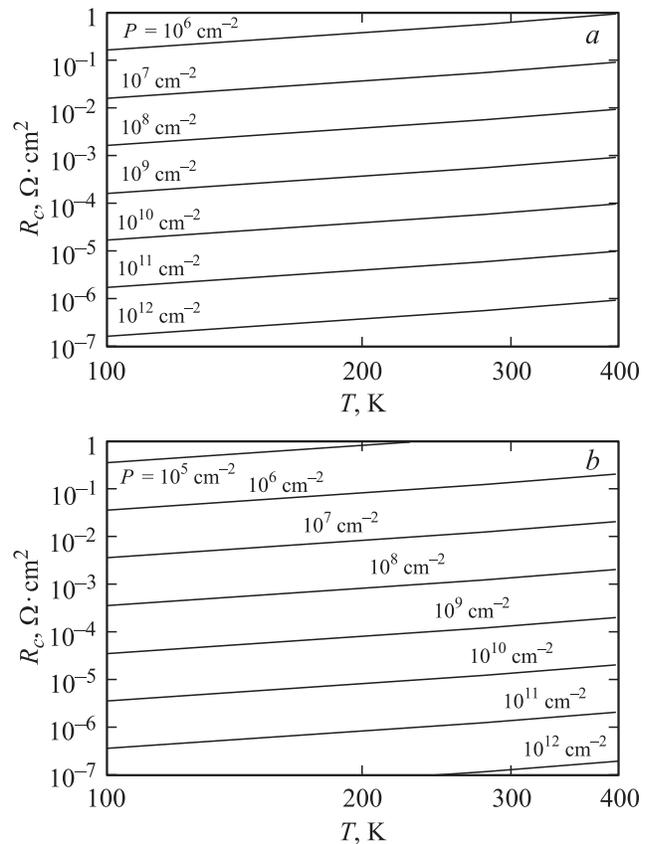


Рис. 6. Расчетные зависимости сопротивления омического контакта металл–полупроводник R_c от температуры T при различных плотностях несовершенств (дислокаций) P в полупроводнике в случае протекания тока по металлическим шунтам: a — GaAs, b — GaN.

Таблица 3. Омические контакты к полупроводникам A^{II}B^{VI}

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ti/Pt/Au	ZnSe	$n = 2 \cdot 10^{19}$	250	$1.1 \cdot 10^{-4}$		[52]
In	ZnSe	$n = 2 \cdot 10^{18}$	250–300		Не образуются соединения, диффузия In	[54]
In/Au	ZnSe	$n = 10^{17}$		10^{-2}		[55]
Si-As/BeTe	ZnSe	p			Структура металл/Si–As/BeTe–ZnSe	[56]
BeTe	ZnSe	$p = 10^{18}$		10^4	Образование Be _x Zn _{1-x} Te _y Se _{1-y}	[57]
BeTe	ZnSe	$p = 2 \cdot 10^{17}$		$6 \cdot 10^{-2}$		[58]
Cu/Au	ZnSe	$p = 4.5 \cdot 10^{18}$		0.167		[55]
Pd	ZnSe	p	250		Образование фазы Pd-Zn-Se	[59]
p^+ -ZnTe	ZnSe	$p = 7 \cdot 10^{16}$		$5 \cdot 10^{-2}$	Резонансное туннелирование дырок	[53],[62]
Ti/Au	ZnO	$n = 10^{19}$	300	$6 \cdot 10^{-8}$	Заглубление поверхности	[64]
Cu _s O	CdTe			$2.2 \cdot 10^{-2}$		[65]

На рис. 6 показаны расчетные зависимости сопротивления омического контакта от плотности дислокаций в полупроводнике в случае, если шунты ответственны за образование омического контакта. Видно, что при низких плотностях дислокаций (10^4 – 10^6 см⁻²), характерных, например, для кристаллов GaAs, механизм протекания тока по металлическим шунтам является несущественным. В то же время при высоких плотностях дислокаций (10^8 – 10^{10} см⁻²), характерных, например, для GaN [43], сопротивление, связанное с металлическими шунтами, может стать определяющим в общем сопротивлении контакта.

Кроме того, в сплавных контактах к полупроводникам с достаточно низкой плотностью дислокаций механизм шунтирования также может оказаться существенным, так как при вплавлении металла в полупроводник плотность несовершенств, в частности, дислокаций сильно увеличивается из-за различия в постоянных решетки контактирующих материалов.

Итак, если в омическом контакте металл–полупроводник ток протекает по металлическим шунтам, то сопротивление контакта увеличивается с ростом температуры, что характерно для металлического типа проводимости.

4. Экспериментальные результаты

4.1. Омические контакты к полупроводникам A^{II}B^{VI}

В полупроводниках A^{II}B^{VI}, а также в нитридах (GaN, AlN) плотность поверхностных состояний мала, и омический контакт образуется с такими металлами, для которых работа выхода электронов Φ_m меньше сродства к электрону полупроводника X_s (n -типа) либо работа выхода электронов из металла Φ_m больше суммы сродства к электрону полупроводника X_s и ширины запрещенной

зоны E_g (p -тип):

$$\Phi_m < X_s \quad \text{в случае } n\text{-типа,} \quad (23)$$

$$\Phi_m > E_g + X_s \quad \text{в случае } p\text{-типа.} \quad (24)$$

Значения работы выхода электронов из металлов Φ_m , энергии сродства к электрону полупроводника X_s , ширины запрещенной зоны полупроводника E_g , плотности поверхностных состояний D_s для разных полупроводников показаны в табл. 2 [10,12,44–49].

В последние годы ZnSe и твердые растворы на его основе начинают использоваться для фотоприемников синего и ультрафиолетового света в основном для регистрации лазерного излучения; эти материалы легко выращиваются на GaAs-подложках.

Омический контакт к n -ZnSe дает, например, In или сплав Ti–Pt–Au ($\Phi_m = 4.3$ эВ), и при создании контакта требуется только удалять возможный промежуточный слой, что достигается термообработкой при $T > 200$ К [50].

В то же время в случае p -ZnSe не существует металлов с работой выхода Φ_m , большей, чем сумма сродства к электрону X_s и ширины запрещенной зоны E_g , и потенциальный барьер всегда существует. Поэтому для создания омического контакта обычно изменяют состав приповерхностной области, например, наращивают на поверхность варизонный слой p -ZnSe_xTe_{1-x} либо используют в качестве металлической пленки HgSe ($X_s = 6.1$ эВ); в результате высота барьера уменьшается до 0.4 эВ [51]. Примеры омических контактов к ZnSe, а также к ZnO показаны в табл. 3 [52–65].

Механизм протекания тока в омических контактах к ZnSe и ZnO подробно не изучался, но на основании того, что сопротивление контакта к сильно легированному n -ZnSe [52] и n -ZnO [64] обычно не зависит от температуры, предполагается туннельный механизм протекания тока. В работе [66] для случая p -ZnSe ($p = 10^{17}$ – 10^{19} см⁻³) предполагается туннелирование

Таблица 4. Омические контакты к *n*-GaN

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ti/Al	$n = 10^{17}$	400–900	$8 \cdot 10^{-6}$	Реакция Ti и GaN	[77]
	$n = 10^{17}$		$8 \cdot 10^{-6}$		[71]
	$n = 3.67 \cdot 10^{18}$		$8.63 \cdot 10^{-6}$		[78]
Ti, TiN, Ti/TiN	$n = 7 \cdot 10^{17}$		$4 \cdot 10^{-6}$		[79]
Ti/Al/Ni/Au	$n = 2 \cdot 10^{17}$	700–800	$1.19 \cdot 10^{-7}$	Понижение барьера Si/Ti и легирование донорами	[80]
	$n = 4 \cdot 10^{17}$		$8.9 \cdot 10^{-8}$		[81]
Ti/Al/Pt/Au	Нанотрубки	800	$1.8 \cdot 10^{-2}$	Донороподобные вакансии V_N	[82]
Ti/Al/W ₂ B/Ti/Au		900	$7 \cdot 10^{-6}$		[83]
Si/Ti			$3.86 \cdot 10^{-6}$		[84]
Ge/Cu/Ge			10^{-5}		[85]
Оксид In-Sn	$n = 10^{19}$		$5 \cdot 10^{-4}$		[86]

вместе с термоэлектронной эмиссией, причем высота барьера, преодолеваемая электронами, была оценена величиной $\Delta\phi_b = 0.3$ эВ (в структурах с $p = 10^{17}$ см⁻³).

4.2. Омические контакты к полупроводниковым нитридам

Похожая ситуация наблюдается и в случае омического контакта к *n*-GaN, который является перспективным материалом для создания светодиодов и фотоприемников, работающих в коротковолновой видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Уровень Ферми на поверхности GaN почти не закреплен [67], однако обычные химически стабильные металлы имеют работу выхода большую, чем сродство к электрону для GaN (табл. 4), и сопротивление омического контакта к GaN существенно увеличивается с ростом работы выхода электронов из контактирующего металла (рис. 7) [68]. Поэтому для создания омического контакта к полупроводникам *n*-типа чаще всего используются многокомпонентные контакты

на основе Ti, образующие в процессе термообработки соединения с низкой работой выхода. Например, в работе [69] омические контакты к *n*-GaN ($n = 1.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³) создавались вплавлением Si/Ti, который при прогреве образует силицид титана — соединение, работа выхода электронов из которого меньше сродства к электрону для GaN ($\Phi_m \approx 3.7$ эВ для Ti₅Si₃).

Низкое сопротивление омического контакта металл–GaN (до 10^{-6} – 10^{-7} Ом · см² при высоких концентрациях носителей в полупроводнике) [70–72] обычно связывают с образованием вакансий азота за счет взаимодействия GaN с материалом контакта, например Ti. Такие вакансии азота образуют нарушенный слой под контактом, играющий роль сильно легированного слоя.

В случае *p*-GaN также не существует металлов с $\Phi_m > X_s + E_g = 7.5$ эВ, и в этом случае либо используются соединения с высокой работой выхода, либо в полупроводнике создается узкозонный приповерхностный слой [73].

Например, при вплавлении Au/Ni в GaN при 600°C образуется несколько бинарных интерметаллических фаз, понижающих потенциальный барьер [74], а вплавление Au/C/Ni позволяет дополнительно легировать приповерхностный слой [75], так как C действует как акцептор. Для *p*-GaN может использоваться также контакт Ru/Ni с отжигом в среде O₂. Образующееся соединение RuO₂ уменьшает эффективную высоту потенциального барьера, а NiO действует как барьер против диффузии высвобождающихся атомов Ga и N. Такой контакт имеет высокое пропускание света (84.6%) и низкое сопротивление ($4.5 \cdot 10^{-5}$ Ом · см²) [76].

Наиболее распространенные контакты к *n*-GaN приведены в табл. 4 [71,77–86], а к *p*-GaN — в табл. 5 [79,87–105].

В табл. 6 [34,83,84,88,91,106–112] рассмотрены данные по механизму протекания тока в омических контактах к *n*- и *p*-GaN. В случае сильно легированного GaN сопротивление омического контакта почти не зависит от температуры (рис. 8, *b*, кривая 1) и уменьшается

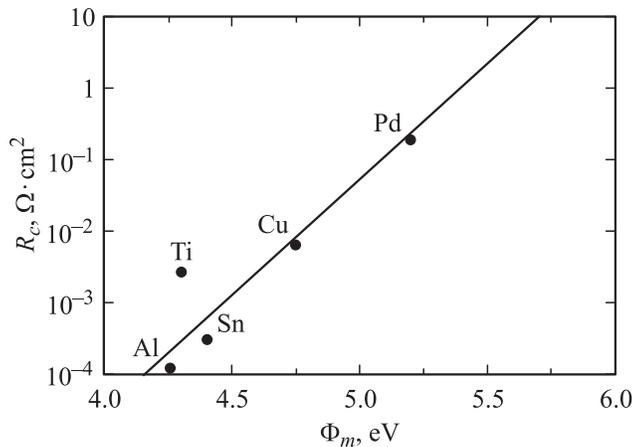


Рис. 7. Экспериментальная зависимость сопротивления омического контакта металл–*n*-GaN (R_c) от работы выхода электронов из контактирующего металла Φ_m [68].

Таблица 5. Омические контакты к *p*-GaN

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °С	Сопротивление контакта R_c , Ом · см ²	Примечание	Ссылки	
Pd	$p = (0.28-2.5) \cdot 10^{17}$	500 750, 950 Без отжига	$2.4 \cdot 10^{-5}$ 10^{-4} $1.5 \cdot 10^{-6}$ $1.1 \cdot 10^{-6}$ $(12-6) \cdot 10^{-3}$ $(8-9) \cdot 10^{-3}$ $2.1 \cdot 10^{-2}$ $4 \cdot 10^{-6}$ $8 \cdot 10^{-3}$	Образование акцепторно-подобных состояний	[87]	
Pd/Ru	$p = 3 \cdot 10^{17}$				[88]	
Pd/Au	$p = 3 \cdot 10^{17}$				[89]	
Pd/Au	$p = 10^{18}$				[89]	
Pd/Au/InGaN	p				[90]	
Ni	$p > 1.7 \cdot 10^{19}$				Образование p -In _{0.19} Ga _{0.18} N	[91]
Ni/Au/InGaN	p				Высокое легирование	[92]
Ni/In	$p = 2 \cdot 10^{17}$				То же	[93]
Ni/Pt/Au	$p = 9.4 \cdot 10^{16}$				[94]	
Ni/Au	$p = 2 \cdot 10^{17}$				[95]	
Pt/Ni	$p = 1.7 \cdot 10^{17}$	[96]				
Ni/Au	p	500	Образование NiO или α -Ni-Ga-O	[97]		
Ni/Au	p	600	Образование вакансий Ga	[79]		
Оксид In-Sn	p	500	Образование p -In _{0.1} Ga _{0.9} и вакансий Ga	[99]		
Pt/Ru	$p = (2-3) \cdot 10^{17}$	[100]				
Ta/Ti	$p = 7 \cdot 10^{17}$	[101]				
Ni/Cr/Au	$p = 5 \cdot 10^{17}$	[102]				
Ni/Pd/Au	p	[103]				
In _{0.19} Ga _{0.18} N	p	[104]				
Ag/Pd	$p = 5 \cdot 10^{17}$	330–530	$(4-6) \cdot 10^{-5}$	Уменьшение высоты барьера	[105]	

Таблица 6. Механизмы протекания тока в омических контактах к *n*- и *p*-GaN

Контакт	Концентрация носителей, см ⁻³	Зависимость от температуры	Зависимость от концентрации	Высота барьера	Механизм протекания тока	Ссылки
<i>n</i> -GaN (теория)			Уменьшается		Туннелирование	[108]
Ti/Ag- <i>n</i> -GaN	$(1.5-1.7) \cdot 10^{18}$		Уменьшается $\propto 1/\sqrt{n}$		» »	[106]
Ti/Ag/Ni/Au- <i>n</i> -GaN	$(4-30) \cdot 10^{17}$		То же		» »	[77]
Ti/Ag/Pd/Au- <i>n</i> -GaN	$6 \cdot 10^{17}-10^{20}$	Возрастает	Уменьшается		» »	[107]
Ti/Al/W ₂ B/Ti/Au- <i>n</i> -GaN		Не зависит			» »	[82]
Ni- <i>p</i> -GaN	$> 1.7 \cdot 10^{19}$	» »			» »	[91]
Pt- <i>n</i> -GaN	$2 \cdot 10^{17}$	Уменьшается $\propto \exp(T^{-1/4})$			Термоэлектронная эмиссия при $T \geq 200$ К Туннелирование при $T \leq 200$ К	[109]
Pt- <i>n</i> -GaN	$(1.8-10) \cdot 10^{17}$	Уменьшается $\propto \exp(1/T)$		0.13	Термоэлектронная эмиссия	[110]
Si/Ti- <i>n</i> -GaN		То же			То же	[111]
Au/Ti/Si/Ti- <i>n</i> -GaN		» »			Термоэлектронная эмиссия	[83]
In- <i>n</i> -GaN	10^{17}	Возрастает			Металлические шунты	[34]
Pd/Ru- <i>p</i> -GaN	$3 \cdot 10^{17}$				Термополевая эмиссия — до отжига, туннелирование — после отжига при 500°С	[88]
Pd/Pt/Au- <i>p</i> -GaN	$(2-22) \cdot 10^{17}$	Уменьшается $\propto \exp(T^{-1/4})$			Прыжковая проводимость	[112]

с ростом концентрации основных носителей заряда (рис. 8, *a*), что дает основание считать главным механизмом протекания тока полевую эмиссию (туннелирование) [80,106–108]. В случае среднелегированного GaN величина сопротивления контакта уменьшается с ростом температуры, что дает основание считать основным механизмом протекания тока термоэлектронную эмиссию [69,109,110,112]. В работе [112] показано, что сопротивление омического контакта уменьшается с ростом температуры, но зависимость R_c от T была слабой, и авторы предположили, что основным механизмом протекания тока является прыжковая проводимость с участием глубоких центров. Таким образом, сопротивление омического контакта к GaN либо не зависит от температуры, либо убывает. Лишь в работе [107] наблюдалось возрастание контактного сопротивления с ростом температуры в интервале 50–300°C, и это

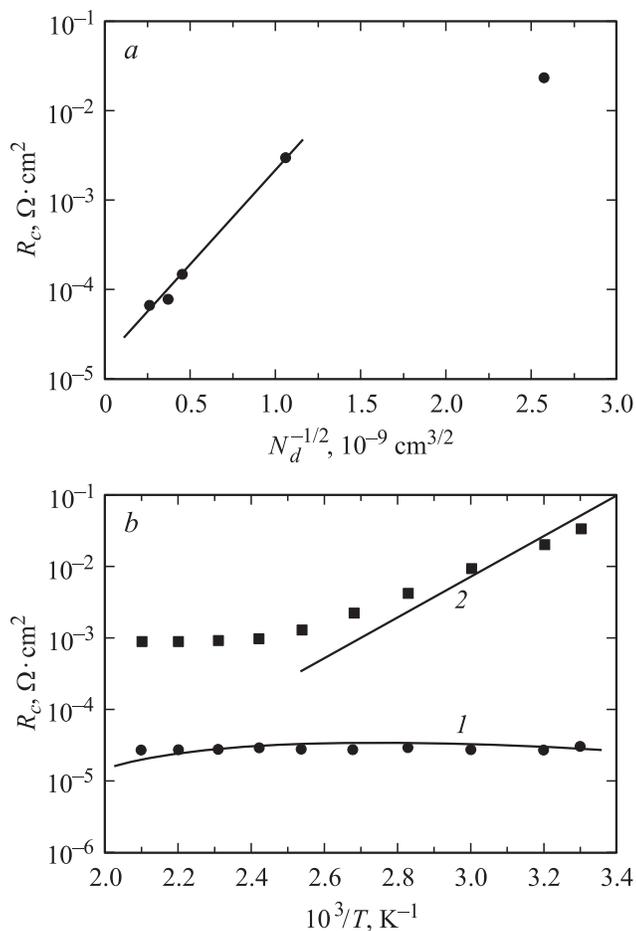


Рис. 8. *a* — зависимость сопротивления омического контакта Ti/Ag–*n*-GaN (R_c) от концентрации нескомпенсированных доноров N_d при 300 К. Механизм протекания тока: туннелирование ($q\phi_b = 0.067$ эВ) [106]; *b* — зависимости сопротивления омического контакта Pt–*p*-GaN (R_c) от температуры. Концентрация нескомпенсированных акцепторов: 1 — $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, механизм протекания тока — туннелирование ($q\phi_b = 0.42$ эВ); 2 — $N_a = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, механизм протекания тока — термоэлектронная эмиссия ($q\phi_b = 0.53$ эВ) [110].

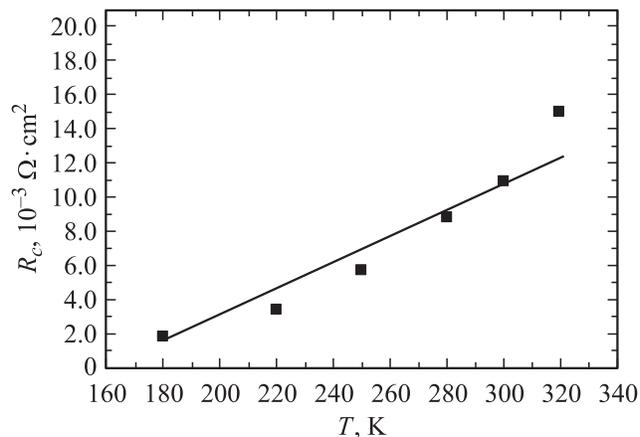


Рис. 9. Зависимость сопротивления сплавного омического контакта In–*n*-GaN (R_c) от температуры. Механизм протекания тока — по металлическим шунтам [34].

объяснялось возникновением нарушений в слое GaN при увеличении температуры, которые вызвали рост потенциального барьера металл–полупроводник.

Отметим, что все исследования были выполнены на контактах с тонкопленочными металлами, в которых GaN существенно не растворяется даже при высоких температурах отжига.

В нашей работе [34] наблюдалось возрастание сопротивления омического контакта In–*n*-GaN с температурой, характерное для металлической проводимости (рис. 9), и было сделано предположение, что сплавной омический In-контакт к GaN, при создании которого происходит растворение полупроводника в металле, может образовываться за счет появления металлических шунтов, пронизывающих слой объемного заряда в результате осаждения атомов In на приповерхностных дислокациях и других несовершенствах полупроводника. Плотность дислокаций в обычных кристаллах GaN составляет 10^7 – 10^8 cm^{-2} . Плотность дислокаций, определенная из температурной зависимости сопротивления омического контакта, была оценена в $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$, т.е. она близка к плотности дислокаций в обычных кристаллах GaN.

Твердые растворы в системе GaN–AlN очень перспективны для ультрафиолетовой фотоэлектроники, однако изготовление омических контактов к твердым растворам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, и особенно к *n*-AlN, представляет существенные трудности, поскольку сродство к электрону в *n*-AlN очень мало (0.6 эВ), а уровень Ферми на поверхности практически не закреплен. Омические контакты к твердым растворам GaN–AlN обычно изготавливают по той же схеме, что и к GaN.

В табл. 7 [113–119] приведены примеры омических контактов к твердым растворам в системе GaN–AlN.

В работе [120] изучался механизм протекания тока в омическом контакте Pd–*p*- $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ при составах, близких к GaN ($x = 0.94$). Было установлено, что при концентрации нескомпенсированных акцепторов

Таблица 7. Омические контакты к твердым растворам в системе AlN–GaN

Металл	Полупроводник	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ti/Al/Ti/Au	<i>n</i> -AlGaN/AlN	700	$5.6 \cdot 10^{-5}$	Образование TiSi и уменьшение высоты барьера Образование TiN	[113]
Al/In	<i>n</i> -AlGaN/AlN	1200	$10^{-4} - 10^{-2}$		[114]
Al, Al/Cr, Al/N, Al/Pt	(AlN) _{<i>x</i>} (SiC) _{1-<i>x</i>}				[115]
Ti/Al/Mo/Au/Si	AlGaN/AlN	800	10^{-6}		[116]
Ti/Al/Mo/Au	AlGaN/GaN	650	$4 \cdot 10^{-6}$		[117]
Ni/Au	Сверхрешетка <i>p</i> -Al _{0.15} Ga _{0.85} N/GaN (<i>p</i> = 10 ¹⁸ см ⁻³)				[118]
Ni	Сверхрешетка <i>p</i> -AlGaN/GaN	400–500	$9.3 \cdot 10^{-4}$	[119]	
Al/Ti	<i>n</i> -AlGaN/GaN	900–950	$5.6 \cdot 10^{-6}$	[114]	

Таблица 8. Омические контакты к InN и твердым растворам на его основе

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ti, Al, N	<i>n</i> -InN	$(1.5 - 2.3) \cdot 10^{18}$	Без отжига	$1.4 \cdot 10^{-7} - 10^{-6}$	Образование β-W ₂ N	[122]
Ti/Pt/Au	<i>n</i> -InN	$5 \cdot 10^{20}$	300–420	$1.8 \cdot 10^{-7}$		[123]
Ti/Pt/Au	InN	$1.63 \cdot 10^{19}$	380	$(5 - 6) \cdot 10^{-7}$	Полевая эмиссия	[123]
W	<i>n</i> -In _{0.17} Ga _{0.83} N		950	$2.7 \cdot 10^{-8}$		[124]
Si _{0.44} , Ti/Al	<i>n</i> ⁺ -In _{0.65} Ga _{0.35} N	» »	Без отжига	$(1 - 4) \cdot 10^{-7}$	» »	[125]
	<i>n</i> -InN			$(1 - 10) \cdot 10^{-7}$		[125]
	<i>n</i> ⁺ -In _{0.75} Ga _{0.25} N	» »	» »	10^{-4}	» »	[125]
W, WSi _{0.44}	<i>n</i> ⁺ -In _{0.65} Ga _{0.35} N	» »	» »	$(1 - 4) \cdot 10^{-7}$	» »	[126]
	<i>n</i> -InN	» »	» »	$(1 - 10) \cdot 10^{-7}$	» »	[126]
W, WSi _{0.44} , Ti/Al	<i>n</i> ⁺ -In _{0.65} Ga _{0.35} N	» »	900	$(1 - 4) \cdot 10^{-7}$	» »	[127]
	<i>n</i> -InN	» »	600	$(1 - 10) \cdot 10^{-7}$	» »	[127]
	<i>n</i> ⁺ -In _{0.75} Ga _{0.25} N	» »	» »	10^{-4}	» »	[127]

$3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ сопротивление омического контакта уменьшается экспоненциально с температурой, что объясняется термоэлектронным механизмом протекания тока. Определенная из зависимости R_c от T высота потенциального барьера оказалась равной 0.05 эВ. Однако при $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18}$ см³ величина R_c уже не зависит от температуры, что дает основание предполагать, что при этих концентрациях основным механизмом протекания тока является туннелирование.

В работе [115] изучалось сопротивление омических контактов к гетероструктурам (AlN)_{*x*}(SiC)_{1-*x*} и было установлено, что с ростом ширины запрещенной зоны гетероструктуры E_g сопротивление контакта возрастает:

$$R_c [\text{Ом} \cdot \text{см}^2] = 2.7 \cdot 10^{-9} \exp \left(\frac{E_g [\text{эВ}]}{0.28} \right). \quad (25)$$

Эта зависимость функционально соответствует установленной ранее зависимости R_c от E_g для твердых растворов GaAs_{1-*x*}P_{*x*} [121].

В полупроводниковых приборах часто используется высокоомный AlN как подложка для создания активных

слоев прибора. Изготовление тонкопленочных омических контактов к этому полупроводнику представляет большие трудности, и в этом случае может использоваться создание сплавных омических контактов с механизмом протекания тока по металлическим шунтам [34].

Перспективным для средневолновой оптоэлектроники является также и InN. Поскольку ширина запрещенной зоны InN составляет около 0.7 эВ, твердые растворы в системе InN–GaN–AlN могут использоваться для солнечных элементов и фотоприемников инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов излучения. Примеры использовавшихся омических контактов к InN и твердым растворам InGaN приведены в табл. 8 [49,122–127].

4.3. Омические контакты к полупроводниковым арсенидам, фосфидам и антимонидам

Полупроводники групп A^{IV} и A^{III}B^V (кроме нитридов и *n*-InAs) на свободной поверхности имеют высокую концентрацию поверхностных состояний, энергетически

расположенных в глубине запрещенной зоны, что приводит к жесткому закреплению уровня Ферми на поверхности. Поэтому для образования омического контакта к таким полупроводникам необходимо:

- 1) понизить плотность поверхностных состояний, либо
- 2) уменьшить высоту потенциального барьера за счет изменения химического состава приконтактной области, либо
- 3) увеличить концентрацию носителей заряда в приконтактной области.

Арсенид галлия в настоящее время широко используется в полупроводниковой электронике и оптоэлектронике для быстродействующих микросхем, приборов СВЧ, детекторов ядерных частиц, светодиодов и лазеров. С другой стороны, арсенид галлия является прямозонным модельным полупроводником для исследования электрических и оптических явлений. Плотность поверхностных состояний в GaAs очень велика (более $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$), и высота потенциального барьера металл–GaAs (барьер Шоттки) почти не зависит от природы металла из-за жесткого закрепления уровня Ферми на поверхности и составляет около 0.9 эВ.

Понизить плотность поверхностных состояний в полупроводнике можно за счет пассивации поверхности в растворах, содержащих ионы серы. При обработке GaAs растворами Na_2S или $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ примесные приповерхностные атомы O (ответственные за поверхностные состояния) замещаются атомами S, которые удерживаются на поверхности за счет физической адсорбции. Выделяющаяся при этом энергия (менее 40 кДж/моль) меньше, чем энергия, выделяющаяся при химической адсорбции (более 100 кДж/моль), и ее недостаточно для образования собственных дефектов, приводящих к закреплению уровня Ферми [128–131]. При этом плотность поверхностных состояний D_s в GaAs после обработки в $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ уменьшается до $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, а после обработки в $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ — до $10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$. Еще меньшая плотность поверхностных состояний D_s в GaAs ($7.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$) была получена при выращивании на поверхности очень тонкого (3.5 нм) слоя $n\text{-GaAs:Ve}$ ($n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) [132], в результате чего уровень Ферми практически не закреплялся на поверхности полупроводника.

Отметим, что пассивация полупроводников в растворах, содержащих ионы серы или других элементов, закрепляющихся на поверхности за счет физической адсорбции, уменьшает плотность поверхностных состояний и для других материалов. Так, обработка поверхности GaN в $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ приводила к снижению величины плотности D_s от 10^{12} до $8.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, при этом высота барьера Шоттки Ni/Cu– $n\text{-GaN}$ составила 1.099 эВ, что оказалось близкой к теоретическому пределу (1.10 эВ) [133]. Пассивация омических структур Ti/Al– $n\text{-GaN:Si}$ ($n = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) приводила к уменьшению сопротивления контакта примерно на 2 порядка за счет удаления окисла с поверхности GaN и сдвига уровня Ферми к краю зоны проводимости [134].

Пассивация 4H-SiC в растворах, содержащих ионы NO и NH_3 , приводила к уменьшению величины D_s от $\sim 10^{13}$ до $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ [135].

В результате снижения плотности поверхностных состояний $n\text{-GaAs}$ ($n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) путем обработки поверхности в растворах H_2S в работе [136] был изготовлен омический контакт Al– $n\text{-GaAs}$ с сопротивлением $(1\text{--}3) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, однако широкого применения этот способ пока не получил.

Наиболее распространенным методом создания омических контактов к GaAs является образование в приконтактной области сильно легированного (до $10^{20}\text{--}10^{21} \text{ см}^{-3}$) приповерхностного слоя, который значительно сужает потенциальный барьер металл–полупроводник. Чаще всего этот слой создается за счет интерфейсных химических реакций, вызывающих диссоциацию GaAs и возникновение нового слоя сильно легированного GaAs [74].

Например, при термообработке широко распространенного омического контакта Al/Ge/Ni вначале при $T < 250^\circ\text{C}$ Ni реагирует с GaAs, образуя Ni_xGaAs , при $T > 250^\circ\text{C}$ эта фаза разлагается с образованием NiGa_y и NiAs_z . При этом Ni реагирует также и с Ge, образуя NiGe, и с Al, образуя Ni_xAl_y ; при охлаждении происходит рост слоя $n^+\text{-GaAs:Ge}$, причем концентрация электронов в этом слое достигает $10^{20}\text{--}10^{21} \text{ см}^{-3}$ [137].

В случае контактов Ni/[Au + Ge(27%)]/Ni/Au– $n\text{-GaAs}$ в процессе нагрева вначале Ge диффундирует из сплава Au + Ge в верхний слой, а Ni реагирует с GaAs, образуя Ni_xGaAs . При температуре 375–400°C Au реагирует с Ga, образуя фазу $\beta\text{-AuGa}$, а Ge проникает в Ni_xGaAs , замещая Ga. Контакт приобретает структуру $\beta\text{-AuGa/NiAs:Ge/GaAs}$, а при охлаждении образуется новый сильно легированный слой GaAs [138]. Сопротивление таких контактов к $n\text{-GaAs}$ достигает $3.6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [139], $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [140], $5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при $n = 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [141] и $4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при $n = 2.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [141].

По мере улучшения технологии сопротивление омического контакта к GaAs улучшалось приблизительно на порядок в десятилетие [6], причем сопротивление контактов было обратно пропорционально концентрации носителей заряда [142].

Другим методом создания омического контакта к GaAs является создание на поверхности узкозонного слоя, чаще всего $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$. В InAs поверхностный уровень Ферми закреплён в зоне проводимости, что значительно снижает высоту потенциального барьера металл–полупроводник в твердых растворах системы GaAs–InAs по сравнению с высотой барьера металл–GaAs. Примером такого контакта может быть In-контакт к GaAs как n -, так и p -типа. Он образуется при нагреве до 300°C , а минимальное сопротивление контакта наблюдается при нагреве до 500°C . При более высоких температурах отжига становится существенным

Таблица 9. Примеры омических контактов к *n*-GaAs

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Au/Ti	5 · 10 ¹⁸	—	2 · 10 ⁻⁶		[143]
Au/Ti		Несплавной контакт	2 · 10 ⁻⁶ (40 К)		[151]
Au/Al/Ti	2 · 10 ¹⁸	Без отжига	3.7 · 10 ⁻³	Промежуточный GaS устраняет пиннинг	[144]
Au/Pt/Ti		—	3 · 10 ⁻⁴		[148]
Au/Ti/W/Ti		400	5.5 · 10 ⁻⁶	Обработка поверхности в (NH ₄) ₂ S	[146]
Au/Ge/Ni/Au	4 · 10 ¹⁷		5.6 · 10 ⁻⁶		[147]
Au/Pt/Ti/GaS	2 · 10 ¹⁸	300	4.1 · 10 ⁻⁶	Образование TiGaS	[157]
Ni/In/Ge		650		Образование In _x Ga _{1-x} As	[150]
Ni/Ge/Au				Ni используется для смачивания	[156]
In		375	3 · 10 ⁻⁶	Образование варизонного слоя In _x Ga _{1-x} As	[158]
<i>n</i> ⁺ -In _x Ga _{1-x} As		Несплавной	10 ⁻⁷	Туннелирование	[154]
In _{0.7} Ga _{0.3} As/Ni/W ₂ Ni/W		550			[170]
Pd/In	(1.6–1.8) · 10 ¹⁸	600	10 ⁻⁶	Образование In _x Ga _{1-x} As	[172]
Pd/Ge			4 · 10 ⁻⁷		[169]
Pd/Sn		360	3 · 10 ⁻⁵		[145]
Pd/Sn, Pd/Sn/Au		360–430	8 · 10 ⁻⁶ –3 · 10 ⁻⁵		[163]
					[164]
					[165]
					[166]
Pd/Sn, Pd/Sn/Au		Несплавной			[153]
Pd/Ge/Ti/Au		340	2.8 · 10 ⁻⁶	Образование фазы AuGa	[160]
					[161]
Pd/Ge/Ti/Pt		400	2.4 · 10 ⁻⁶	Образование Ga ₅ Pd	[149]
Pd/Ge/Ti/Pt		380–450	(2.4–5.3) · 10 ⁻⁶		[152]
Pd/Ge/Au/Pd/Au		400	2 · 10 ⁻⁶		[155]
Pd/Ge/Au/Pd/Au		400	2.1 · 10 ⁻⁶	Образование AuGa и Pd ₅ Ga ₂	[159]
Pt/Ti/Ge/Pd	5 · 10 ¹⁸	450–600		Образование Ge ₃ Pd ₂₁	[162]
Ge/Cu	7 · 10 ¹⁷	400	7 · 10 ⁻⁷	Образование сильно легированного слоя GaAs:Ge	[167]
WSi		400	6 · 10 ⁻⁶	Образование β-AuGa и WSi ₂	[168]

Таблица 10. Омические контакты к *p*-GaAs

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Au/Ti	10 ¹⁷		9 · 10 ⁻⁶		[173]
Au/Ge, Au/Ti	Полуизолятор GaAs:Cr $\rho = 10^6 - 10^7$ Ом · см ²	300–320			[181]
Au/Ti/Pd		320–380			[180]
Au:Cu/Pt:Ir/Ti	<i>p</i> ⁺	400	1.47 · 10 ⁻⁶	Барьер Pt–Ti против глубокой примеси Cu	[174]
Ni/Pd/Au		300	2 · 10 ⁻⁶		[175]
In	Полуизолятор			Лазерное осаждение	[182]
In _x Ga _{1-x} As				Может использоваться для <i>n</i> - и <i>p</i> -типа GaAs одновременно	[178]
PdIn		< 400	10 ⁻⁷	Удобный контакт для приборов СВЧ	[176]
Pd/Ge/Ti/Pt, Ti/Pd	<i>p</i> ⁺	550			[179]
ε ₁ -Cu ₃ Ge	7 · 10 ¹⁸	400	5 · 10 ⁻⁶		[177]

Таблица 11. Примеры омических контактов InGaAs и AlGaAs

Металл	Полупроводник	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
AuBe/Au, Pd/AuBe/Pt/Au	AlGaAs/GaAs	400	$4 \cdot 10^{-6}$		[193]
Au/Pt/Ti/WN _x	n-InGaAs	250–450	$10^{-8} - 10^{-7}$		[187]
Au/Pt/Ti/WSiN	n ⁺ -InGaAs		$2 \cdot 10^{-7}$		[190]
Au/Ni/Au/Ge/Pd	n-InGaAs	400			[186]
Au/Ni/Au/Ge/Pd	n-InGaAs	400	10^{-6}		[189]
Pd/Ge	AlGaAs/GaAs				[197]
Pd/Ge	n-InGaAs	400			[191]
Pd/Si/Ti/Pt	n-InGaAs	425	$(1-2) \cdot 10^{-6}$		[183]
Pd/Ge/Ti/Pt	n-InGaAs	400	$3.7 \cdot 10^{-6}$	Образование PdGe и диффузия Ge	[184]
Pd/Pt/Au/Pd	p-InGaP $p = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	415–440		Образование PdGa, PdAs ₂ , In _x Ga _{1-x} P	[192]
Pd/Ga/Ti/Au	n-AlGaAs/InGaAs		$(2.3-95) \cdot 10^{-6}$	Контакт образуется за счет Au ₂ Al и β-AuGa	[195]
Pd/Si/Pd/Ti/Au	n-InGaAs	300–400	$4.3 \cdot 10^{-7}$	Образование фазы Pd ₂ Si	[188]
Pd/Ge(Si)/Pd/Ti/Au	n-InGaAs	425	$(0.9-1.1) \cdot 10^{-6}$		[174]
Ti/Pt/Au	GaAs с вертикальными слоями InGaAs		$(1-10) \cdot 10^{-6}$	Образование сверхрешетки, $\phi_b = 0.14-0.26 \text{ В}$	[181]
Be-In/As/Au	AlGaAs-p-GaAs $p = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$				[196]
WN _x /WN _{0.5x} /W	n-InGaAs	400	$2 \cdot 10^{-7}$		[194]
					[185]

испарение атомов As, что увеличивает сопротивление контакта.

Различные типы омических контактов к n-GaAs приведены в табл. 9 [143–172]; к p-GaAs в табл. 10 [173–182]; к твердым растворам на основе GaAs в табл. 11 [174,181,183–197]. В таблицах приведены результаты работ последнего десятилетия; более ранние работы проанализированы в обзорах [6,13].

В результате технологических работ сопротивление омических контактов R_c к GaAs достигало очень низких значений (10⁻⁶–10⁻⁸ Ом · см²), например [21,198–202], и в ряде работ изучался механизм протекания тока в омических контактах к GaAs [111,203–211].

В работах [111,148,151,154,208–211] (табл. 12) исследовались контакты, в которых не происходило существенного растворения полупроводника в металле — контакты были либо несплавными, либо тонкопленочными, либо проходили термообработку при низких температурах (~ 300°C). В этих работах главным образом исследовались контакты к GaAs с высоким содержанием легирующей примеси (10¹⁸–10²⁰ см⁻³). В таких контактах высота потенциального барьера была достаточно высокой 0.14–0.26 эВ [205], 0.5 [209], 0.3–0.5 эВ [206], и основным механизмом протекания тока являлось туннелирование, причем низкое сопротивление контакта обеспечивалось сильным сужением потенциального барьера (рис. 10).

В то же время для слабо легированного GaAs (концентрация электронов меньше 10¹⁷ см⁻³) не удавалось

создать сильно легированную приконтактную область, поэтому высота потенциального барьера понижалась за счет интерфейсных реакций; она достигала величины 0.068 [111] и 0.09 эВ [204]. Это обеспечивало существенный надбарьерный ток и термоэлектронный механизм его протекания. Термоэлектронный механизм протекания тока был зарегистрирован и для твердого

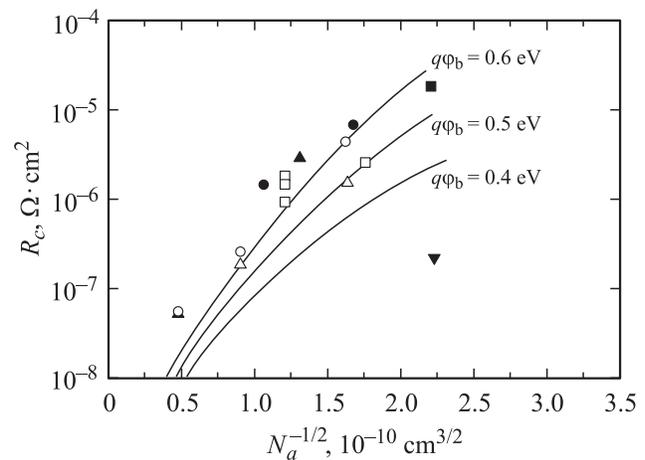


Рис. 10. Зависимости сопротивления омического контакта к p-GaAs (R_c) от концентрации нескомпенсированных акцепторов N_a в исходном материале при 300 К. Механизм протекания тока — туннелирование (qφ_b = (0.4–0.6) эВ). Линии — расчетные зависимости, точки — экспериментальные данные [209].

Таблица 12. Механизмы протекания тока в омических контактах к GaAs

Контакт	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Механизм протекания тока	Высота потенциального барьера, эВ	Ссылки
In- <i>n</i> -GaAs	$n = 4 \cdot 10^{15}$	Термоэлектронная эмиссия	0.03	[203]
Au/Pt/Ti- <i>n</i> -GaAs	$n > 10^{18}$	» »	0.09	[148]
Pt/Ti/ <i>p</i> -GaAs	$p = (5-10) \cdot 10^{18}$	» »	0.068	[111]
InAs/ <i>n</i> -GaAs	$n = 10^{20}$	Туннелирование	0.14–0.26	[205]
Au/Ti-GaAs	$> 5 \cdot 10^{18}$	» »	< 0.7	[151]
<i>n</i> ⁺ -In _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As- <i>n</i> -GaAs		» »		[154]
Ti/Pd, NiGeAu-GaAs		» »		[208]
Ti/Pt/Ag- <i>p</i> -GaAs	$p = 4 \cdot 10^{20}$	» »	0.5	[209]
Au/Ti- <i>n</i> -GaAs (теория)	$n = 10^{20}$ $n = 10^{18}$	Туннелирование между металлическим состоянием и зоной проводимости	0.3–0.5	[210]
Ni/In _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As/ <i>n</i> -GaAs		–	0.13	[211]

раствора In_{0.53}Ga_{0.47}As (рис. 11), причем после быстрого термоотжига механизм протекания тока изменялся к термополевой эмиссии [207].

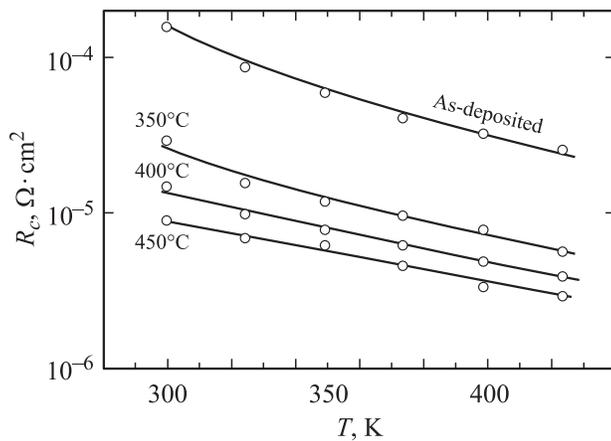


Рис. 11. Зависимости сопротивления омического контакта Pt/Ti-*p*-In_{0.53}Ga_{0.47}As R_c от температуры T при различных условиях обработки контактов. Механизм протекания тока для контактов, не прошедших термообработку, — термоэлектронная эмиссия ($q\phi_b = 0.13$ эВ). С ростом температуры отжига механизм протекания тока переходит к термополевой эмиссии [207].

Термоэлектронная эмиссия наблюдалась и в сплавленном омическом контакте In-*n*-GaAs [203] (рис. 12). Высота потенциального барьера в этом случае была очень низкой (0.03 эВ) из-за образования варизонных твердых растворов In_{*x*}Ga_{1-*x*}As с узкозонным слоем вблизи металла. В современных кристаллах арсенида галлия плотность дислокаций и других несовершенств достаточно мала ($\sim 10^2-10^4$ см⁻²), и поэтому образование металлических шунтов несущественно для образования омического контакта. Сопротивление омических контактов в сплавленных структурах уменьшалось с ростом температуры (так же как и для несплавленных контактов), и основным механизмом протекания тока была термоэлектронная эмиссия.

Другим широко распространенным полупроводником A^{III}B^V с высокой плотностью поверхностных состояний является GaP. Уровень Ферми на поверхности GaP закреплён практически в середине запрещенной зоны.

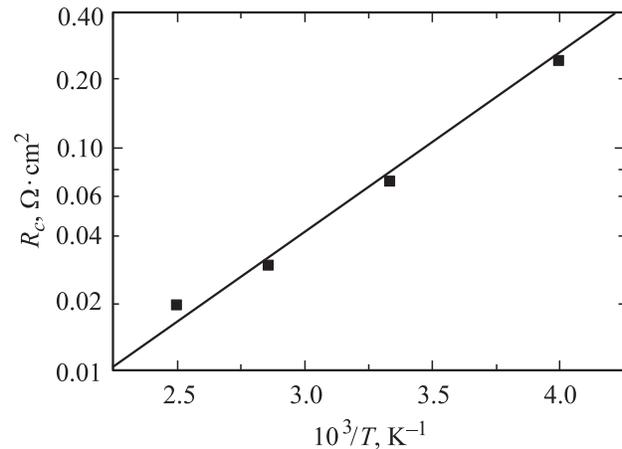


Рис. 12. Зависимость сопротивления сплавленного омического контакта In-*n*-GaAs R_c от температуры T . Механизм протекания тока — термоэлектронная эмиссия ($q\phi_b = 0.03$ эВ) [203].

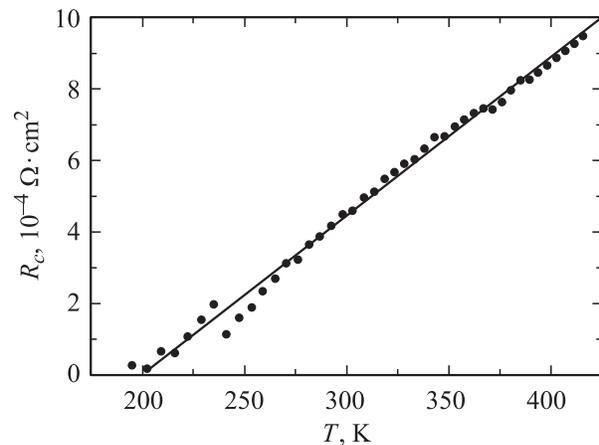


Рис. 13. Зависимость сопротивления сплавленного омического контакта In-*n*-GaP R_c от температуры T . Протекание тока по металлическим шунтам [33].

Таблица 13. Омические контакты к GaP

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Al/Si/Pd	<i>n</i> -GaP		550	10 ⁻⁵	Твердотельная эпитаксия Si на GaP То же	[214]
Si/Pd	<i>n</i> -GaP	5 · 10 ¹⁷	350–650	2 · 10 ⁻⁴		[215]
In	<i>n</i> -GaP	3 · 10 ¹⁷	550	6 · 10 ⁻⁵	Металлические шунты Образование фаз <i>p</i> - <i>p</i> ⁺ -ZnP ₂ , Zn ₃ P ₂	[216]
Pd/Zn/Pd	<i>p</i> -GaP	2 · 10 ¹⁷				[33]
						[217]
Ni, Ti + Au	<i>p</i> -GaP:Be	5 · 10 ¹⁹	400			[218]
	<i>p</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	2 · 10 ¹⁹				[219]
						[220]
						[221]

Таблица 14. Омические контакты к *n*-InP

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Au/Ge/Ni	8 · 10 ¹⁸	450	10 ⁻⁸	Образование Ni ₂ P + Al ₁₀ In ₃	[226]
Au/Ge/Ni	10 ¹⁷	250–400	10 ⁻⁷		[230]
Au/Ge/Pd		350	2.5 · 10 ⁻⁶	Сильное легирование Ge	[233]
Au/Pd/Te	4 · 10 ¹⁵		10 ⁻⁴	Образование In ₂ Te ₃	[231]
	4 · 10 ¹⁸		10 ⁻⁶		
Au/Si/Pt		550	2.77 · 10 ⁻⁵		[225]
Au/Ru/Au-Ge/Ni		400	10 ⁻⁷		[236]
Au/Pt/Au/Ge		500	2.15 · 10 ⁻⁶		[232]
Ni/AuGe/Au		300			[224]
Ni/Au/Pt/Au/Pt/Ti/Ni				Образование фазы Ni-P	[234]
Pd/Ge		350	4.2 · 10 ⁻⁶		
Ge/Pt/Ge/Pt		500	7.71 · 10 ⁻⁷	Легирование Ge	[235]
Al/Ti		600		Образование Al/Ti/In/Ti- <i>p</i> -InP	[228]
Ti/Pt/Au		Несплавной контакт	3.4 · 10 ⁻⁶	Образование InN	[222]
W-Sb			400	10 ⁻⁶	P диффундирует в W и образуется фаза In-Sb
W/Sb, W-In-Sb		400	10 ⁻⁶		[227]
WS _{0.79}	1.4 · 10 ²⁰ (InP:Te)		10 ⁻⁶		[229]

Фосфид галлия широко используется в светодиодах красного, желтого и зеленого света и фотоприемниках УФ излучения [212,213]. Омические контакты к GaP изготавливались во многих работах (примеры приведены в табл. 13) [33,214–221], однако механизм протекания тока в них практически не изучался.

В нашей работе [33] была обнаружена аномальная температурная зависимость сопротивления омического контакта R_c для контактов In-*n*-GaP: оно возрастало с ростом температуры, и было сделано заключение, что основным механизмом протекания тока в омическом контакте является протекание тока через металлические шунты (рис. 13). При этом становится понятным, почему In образует омический контакт с GaP. В случае In-контакта к GaAs возможно образование варизонной фазы In_xGa_{1-x}As, причем вблизи поверхности может создаваться не только твердый раствор, но и *n*-InAs, в котором уровень Ферми закреплен в зоне проводимости;

в то же время в случае GaP образование варизонной фазы может привести лишь к образованию InP на поверхности, а у этого полупроводника достаточно большая ширина запрещенной зоны, и уровень Ферми закреплен в ее глубине. Можно предположить, что в этом случае In осаждается на дислокациях и других несовершенствах и образует металлические шунты. Определенное из температурной зависимости сопротивления контакта количество In-шунтов в кристаллах GaP почти не зависело от температуры и было $\sim 10^7$ см⁻², что близко к величине плотности дислокаций в GaP. В случае GaAs плотность дислокаций обычно на 3–4 порядка меньше, и шунты не играют существенной роли в механизме протекания тока. В результате термоэлектронная эмиссия является главным механизмом протекания тока в контакте In-GaAs, а металлические шунты — основным механизмом протекания тока в сплавном контакте In-GaP.

Таблица 15. Омические контакты к *p*-InP

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °С	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Au/Zn	5 · 10 ¹⁸	280	7 · 10 ⁻⁶	Образование Au _x In _y и Au ₂ P ₃ Образование Ni _{2,7} InP и Pd ₂ InP	[226]
Au-Be/Ru/Au	(1–4) · 10 ¹⁸		(2–7) · 10 ⁻⁴		[246]
Au/Zn/Au/Ti/Au					[242]
Ni, Pd/Zn/Ni, Pd			7 · 10 ⁻⁵		[240]
Pd/Zn/Pd/Au		400	7 · 10 ⁻⁵	Образование Pd ₂ InP–PdP ₂	[241]
Pd/Zn/Pd(Pt)			7 · 10 ⁻⁶		[237]
Pd/Sb/Zn/Pd			2 · 10 ⁻⁶		[238]
Ge/Pd(Zn)		500	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴	Образование фазы InSb	[239]
Sb/Zn/Pd		400		Образование Pd ₂ InP Удаление окисла, диффузия Au, Zn в InP	[247]
Sb/Zn/Au/Nb		375			[243]
Zn ₃ P ₂ /InP		325	4 · 10 ⁻⁵		[244]
			10 ⁻⁵	Гетеропереход Zn ₃ P ₂ /InP	[245]
					[248]

Таблица 16. Омические контакты к твердым растворам InGaAs/InP и InAlAs/InP

Металл	Полупроводник	Температура отжига, °С	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Ссылки
Ti/Pt/Cu	InGaAs	350		[250]
AuGe/Ni/Au	InGaAs			[251]
TiN _x	InGaAs/InP	500		[253]
Pt/Zn/Pt/ZrB ₂ /Au	<i>p</i> -InGaAs/InP			[252]
W(Zn)	<i>p</i> -InGaAs/InP (<i>p</i> = 10 ¹⁸ см ⁻³)		5 · 10 ⁻⁶	[254]
PdGe	<i>n</i> -In _{0.53} Ga _{0.47} As/InP	425	6.6 · 10 ⁻⁸ –1.4 · 10 ⁻⁶	[255]
Pd/Zn/Pd/Au	<i>p</i> -In _{0.47} Ga _{0.53} As/InP	500	7.5 · 10 ⁻⁶	[256]
Pd/Zn/Pd/Au	<i>p</i> -InGaAsP/InP	400	2 · 10 ⁻⁶	[257]
Ge/Ag/Ni	(<i>p</i> = (1–1.5) · 10 ¹⁹ см ⁻³) <i>n</i> -InAlAs/InP	425	2.26 · 10 ⁻⁷	[249]

InP, и особенно твердые растворы InGaP, выращенные на InP-подложках, используются для изготовления полевых транзисторов с двумерным электронным газом с высокой подвижностью электронов. Примеры омических контактов к InP *n*-типа приведены в табл. 14 [222–236], а к InP *p*-типа — в табл. 15 [226,237–248]. В табл. 16 [249–257] приведены примеры омических контактов к твердым растворам InGaAs/InP и InAlAs/InP.

Основным механизмом протекания тока в омических контактах к InP *p*-типа является термоэлектронная эмиссия через барьер $q\phi_b < 0.2$ эВ [258], а для AuZn(Ni)-контактов к сильно легированному InP *n*-типа ($n = 1.4 \cdot 10^{20}$ см⁻³) — туннелирование [259].

GaSb и твердые растворы на его основе используются для светодиодов и фотоприемников в средней инфракрасной области [260]. Уровень Ферми на поверхности GaSb закреплен вблизи края валентной зоны [261]. Примеры омических контактов к GaSb и твердым растворам на его основе приведены в табл. 17 [261–272].

В табл. 18 [273–278] приведены примеры омических контактов к узкозонным полупроводникам InAs и

HgCdTe. Механизм протекания тока в таких контактах практически не изучался.

4.4. Омические контакты к полупроводникам группы IV

Омические контакты к Si и Ge изучались уже несколько десятилетий и подробно рассмотрены в монографиях Милнса и Фойхта [9] и Родерика [10], поэтому мы не будем останавливаться на этих структурах и в данном обзоре рассмотрим омические контакты к новым полупроводникам — алмазу и карбиду кремния.

Алмаз — наиболее широкозонный полупроводник из применяемых в оптоэлектронике ($E_g = 5.5$ эВ, $E_0 \approx 7.3$ эВ). Он может использоваться в фотоприемниках для коротковолновой, особенно вакуумной (ультрафиолетовой) области спектра. Омические контакты к C обычно создаются на основе металлов Ti, Mo или Ta, которые образуют в процессе отжига карбиды. Примеры омических контактов к алмазу приведены в табл. 19 [279–298]. Подробные исследования механизмов протекания тока в таких контактах не проводились.

Таблица 17. Омические контакты к GaSb

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °С	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Au/Ge/Pd	<i>n</i> -GaSb			$4.9 \cdot 10^{-6}$	Образование поли-AuSb ₂	[265]
Au/Ge/Ni, Ag/Au/Ge/Ni	<i>n</i> -GaSb		400	$8 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-3}$		[269]
Pd(Ge,S)	<i>n</i> -GaSb	$1.2 \cdot 10^{18}$		$4 \cdot 10^{-5}$		[267]
Pd/Ge/Pd/In/Pd	<i>n</i> GaSb	$5.6 \cdot 10^{17}$	350	$1.4 \cdot 10^{-6}$		[261]
Pd/Ge/Pd		$1.8 \cdot 10^{18}$		$3.8 \cdot 10^{-6}$		
Pd/Ge/Au/Pt/Au	<i>n</i> -GaSb	$1.3 \cdot 10^{18}$		$2 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$		[262]
	<i>n</i> -GaInAsSb/GaAs	$3 \cdot 10^{18}$		$2 \cdot 10^{-6}$		[263]
Pd, Pd/Sb, Ge/PbGe/Pd/Sb	<i>n</i> -GaSb		300–325	$(1-10) \cdot 10^{-4}$	Образование <i>n</i> -Ge/ <i>n</i> -GaSb гетероперехода	[266]
Pd ₃ In ₇ /Pt(W, WSi ₂ , WSiN)	<i>n</i> -GaSb	$2 \cdot 10^{18}$	325–350	10^{-6}	Туннелирование	[264]
Te–Au	<i>n</i> -GaSb			10^{-6}		[268]
Ti/Pt/Au	<i>n</i> -GaAs _{1-x} Sb _x		250–500	$3 \cdot 10^{-7}$		[270]
Au, Ag	<i>p</i> -GaSb	10^{18}	250–350	$5 \cdot 10^{-5}$		[272]
		10^{19}		$5 \cdot 10^{-6}$		
Zn–Au	<i>p</i> -GaSb			10^{-5}		[268]
Ti/Au, Pt/Au, Pd/Au, Ni/Au	<i>p</i> -GaSb		Несплавной	$2.6 \cdot 10^{-7}$		[271]
Ti/Pt/Au	<i>p</i> -GaSb	$6.6 \cdot 10^{16}$				[267]

Таблица 18. Омические контакты к InAs и HgCdTe

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °С	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ti/Pt/Au	<i>n</i> -InAs		350	$9.8 \cdot 10^{-7}$		[273]
Au/Ge, Au/Te	<i>n</i> -InAs		325	$2.3 \cdot 10^{-7}$		[274]
Сверх-решетка { варизонная обычная	<i>n</i> -InAs– <i>n</i> -GaAs	10^{19}	Несплавной контакт	$5 \cdot 10^{-8}$ $10^{-8} - 10^{-5}$	Высота барьера 0.14–0.26 эВ Термополевая эмиссия	[275]
Ti	HgCdTe		То же	10^{-4}		[276]
Pd/Pt/Au	<i>p</i> -InAs			$9.6 \cdot 10^{-7}$		[277]
Ti				$2.6 \cdot 10^{-7}$		
Pd/Pt/Au	AlSb/InAs		175			[278]

В сильно легированном алмазе *n*- и *p*-типа основным механизмом протекания тока считается туннелирование [280,282,291,294,298] на основании того, что сопротивление контакта не зависит от температуры.

Карбид кремния — полупроводник, активно используемый для высокотемпературной, высокочастотной и высокоомощной электроники. Этот полупроводник имеет несколько политипов, наиболее распространенные это 4H-SiC ($E_g = 3.23$ эВ, $E_0 \approx 5$ эВ) и 6H-SiC ($E_g = 3.0$ эВ, $E_0 \approx 5.5$ эВ). Карбид кремния — полупроводник с преимущественно ковалентной связью и поверхностными состояниями, обусловленными наличием вакансий углерода. Высота потенциального барьера на границе металл–SiC, особенно в случае 6H-SiC, сильно зависит от работы выхода электронов из металла [299,300].

Омические контакты к *n*-4H-SiC и *n*-6H-SiC часто изготавливаются на основе Ni ($\Phi_{Ni} = 5.15 - 5.2$ эВ). Они

могут создаваться как без отжига, так и с помощью отжига, при котором удаляются окислы и другие слои с поверхности полупроводника. Примеры омических контактов к 4H-SiC приведены в табл. 20 [301–328], к 6H-SiC в табл. 21 [329–339].

Изготовление контактов к *p*-SiC представляет большие трудности в связи с большой шириной запрещенной зоны полупроводника. Для этой цели обычно используются металлы с высокой работой выхода: Ni, Pt, Pd, Au, которые при нагреве до 800–1000°С образуют соединения (типа Ti₃SiC₂), значительно уменьшающие высоту барьера металл–полупроводник (см. табл. 20).

В работах [314,316,334,340] изучался механизм протекания тока в омических контактах к карбиду кремния. На основании температурных зависимостей сопротивления контакта предполагалось, что основным механизмом протекания тока является термоэлектронная эмиссия.

Таблица 19. Омические контакты к алмазу

Металл	Полупроводник	Концентрация носителей, см^{-3}	Температура отжига, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление контакта, $\text{Ом} \cdot \text{см}^2$	Примечание	Ссылки
Au, Cu	$n\text{-C:P}$	$5 \cdot 10^{17}$				[279]
Ti, Au	$n^+\text{-C:P}$				Туннелирование	[280]
Al_2O_3	C-нанотрубки					[281]
Au	$p\text{-C}$			$< 10^{-3}$		[285]
Au/Ti	$p\text{-C}$	10^{20}		$1.2 \cdot 10^{-6}$	Образование TiC	[290]
Au/Ti	$p\text{-C}$		500	$1.6 \cdot 10^{-6}$	Туннелирование	[291]
Au/Ti	$p\text{-C}$			$2 \cdot 10^{-4}$	Образование TiC	[292]
Au/Ti	$p\text{-C:B}$	10^{20}	500	10^{-4}	Туннелирование	[298]
Au/Pt/Ti	$p\text{-C}$					[293]
Au/Pt/Ti	$p\text{-C:B}$		600	$1.3 \cdot 10^{-5}$		[286]
Au/Ta	$p\text{-C:B}$				Образование TaC	[288]
						[289]
Al/Si	$p\text{-C:B}$		450		Туннелирование	[294]
Al/Si	$p\text{-C:B}$		450	10^{-7}		[297]
Al/Si, Ti/Au,	$p\text{-C}$				Туннелирование,	[282]
TiWN/Au					R_c уменьшается $\sim 1/T$	
Ti, Mo	$p\text{-C}$	$3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{20}$	400–600	До 10^{-6}	Образование $\alpha\text{-Mo}_2\text{C}$, поле- вая и термополевая эмиссия	[296]
Ti/Au	$p\text{-C:B}$	$7 \cdot 10^{20}$	850	$10^{-6} - 10^{-5}$		[283]
Ti/Au	$p\text{-C:B}$		850	10^{-5}	Образование TiC	[284]
TiC/Au, TaSi ₂ /Au	$p\text{-C:B}$		850	10^{-5}		[295]
Pt/Ti/Au	$p\text{-C:B}$	10^{18}	450	10^{-4}		[287]

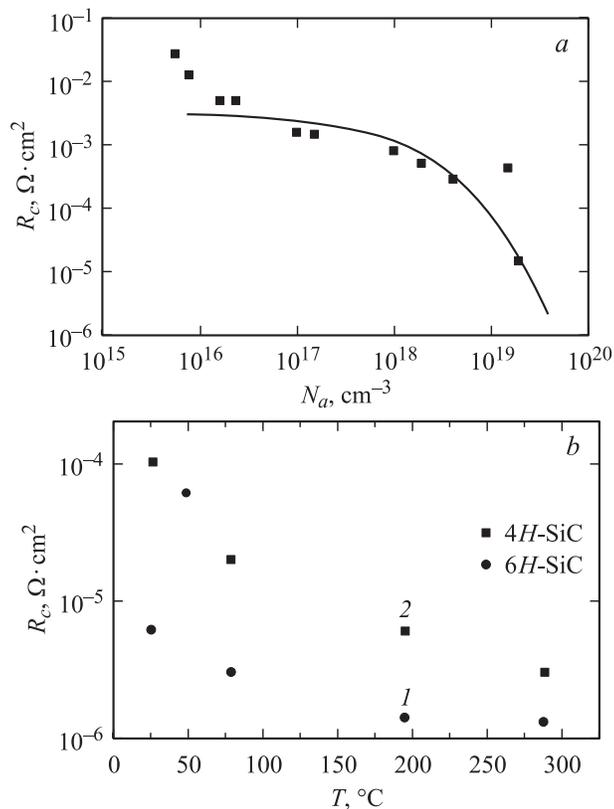


Рис. 14. Зависимости сопротивления омического контакта R_c : *a* — от концентрации нескомпенсированных акцепторов N_a при 300 К для Al/Ti-*p*-4H-SiC [340]; *b* — от температуры T для Al/Ti-*p*-6H-SiC (1) и Al/Ti-*p*-4H-SiC (2). Механизм протекания тока: термополевая эмиссия ($q\varphi_b = 0.53$ эВ для 6H-SiC и $q\varphi_b = 0.82$ эВ для 4H-SiC) [334].

Определенные из этих зависимостей значения высот потенциального барьера металл-SiC различались на порядок: от 0.097 эВ для 4H-SiC [316] до 0.97 эВ для 6H-SiC [334]. В работе [314] температурные зависимости сопротивления контакта не точно следовали теории термоэлектронной эмиссии, и авторы предположили, что в этих случаях основным механизмом протекания тока является термополевая эмиссия.

В работе [340] изучалась зависимость сопротивления контакта от концентрации дырок в 4H-SiC. Экспериментальные данные совпадают с теорией, если допустить, что туннельная эффективная масса и эффективная масса плотности состояний равна массе свободного электрона, при этом высота барьера, преодолеваемая электронами, оказалась равной 0.37 эВ (рис. 14, *a*). Температурные зависимости сопротивления контакта [334] показали, что основным механизмом протекания тока в *p*-4H-SiC и *p*-6H-SiC ($p \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) является термополевая эмиссия (рис. 14, *b*).

5. Основные выводы по механизмам протекания тока

5.1. С точки зрения создания омических контактов все основные полупроводники можно разделить на 2 группы.

1) Полупроводники с низкой плотностью поверхностных состояний, расположенных в глубине запрещенной зоны (например, ZnSe, GaN, SiC), либо с поверхностными состояниями, расположенными в зоне проводимости (*n*-InAs). Омические контакты к таким полупроводникам

Таблица 20. Омические контакты к 4H-SiC

Металл	Концентрация, см ⁻³ или тип носителей	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ni	<i>n</i>	Без отжига	$1.3 \cdot 10^{-5}$	Использование слоя Si	[304] [305]
Ni	<i>n</i>	1000			[306]
Ni	<i>n</i>	1000		Образование слоев Ni ₃₁ Si ₁₂ и Ni ₂ Si; образование донороподобных вакансий С, высота барьера 0.38 эВ	[309]
Ni	<i>n</i> ⁺		10^{-6}		[310]
Ni/Ti/Au	$n = 10^{19}$	800	10^{-4}		[320]
Ni, Ni/W, Ni/Ti/W Ni/Cr/W, Cr/Mo/W Cr	<i>n</i>	1000–1050		Образование Ni ₂ Si или слоя Cr ₃ C ₂	[311]
	<i>n</i>				[303]
Pt/Ti/WSi/Ni	<i>n</i>	950–1000			[318]
Co/Si/Co	<i>n</i>	800	$1.5 \cdot 10^{-6}$	Образование слоя CoSi ₂	[301] [307]
					[308]
Al/Ti	<i>p</i>		10^{-4}	Образование слоев Ni ₂ Si и TiC	[313]
Al/Ti	$p^+ (> 10^{20})$		10^{-4}		[327]
Al/Si	<i>p</i>	750	$3.8 \cdot 10^{-5}$	Термоэлектронная эмиссия	[314]
Al/Si	<i>p</i>	700–950	$9.6 \cdot 10^{-5}$		[315]
Al/Si	<i>p</i>	950	$9.5 \cdot 10^{-5}$	Образование Al ₄ C ₃	[317]
Al/Ti/Ni	$p = 10^{19}$		$9 \cdot 10^{-5}$	Термополевая эмиссия через барьер 0.097 эВ	[316]
Au/Al/Si, Au/Ti/Al	<i>p</i>	700	$(1.4–8.3) \cdot 10^{-5}$		[322]
Au/Ti/Au, Ti/Au	<i>p</i>	1000	$(2–7) \cdot 10^{-5}$	Образование Ti ₃ SiC ₂	[323]
Au/Ti/Al, Au/Pd/Al	<i>p</i>	850–950	10^{-5}	То же	[325]
Ti/Al	<i>p</i>	1000	10^{-5}	Образование Al ₃ Ti, Ti ₃ SiC ₂ , Al ₄ C ₃ , Ti ₅ Si ₃	[319]
Ti/Al/Ge	<i>p</i>	600	10^{-4}		[324]
Ni/Ti/Au	$p = 4.5 \cdot 10^{18}$	800	10^{-3}		[320]
Pd	<i>p</i>	750	$5.52 \cdot 10^{-5}$		[312]
Pd	<i>p</i>	600–700	$5.5 \cdot 10^{-5}$	Образование PdSi ₂	[326]
Si/Pt	<i>p</i>	1100	10^{-4}	Диффузия С в металлические слои	[328]
Ge/Ti/Au	<i>p</i>	800	10^{-4}	Образование Ti ₃ SiC ₂	[321]

Таблица 21. Омические контакты к 6H-SiC

Металл	Концентрация носителей, см ⁻³	Температура отжига, °C	Сопротивление контакта, Ом · см ²	Примечание	Ссылки
Ni, Ni/W, Ni/Ti/W, Ni/Cr/W, Cr/MoW	<i>n</i>	1000–1050		Образование Ni ₂ Si или слоя Cr ₃ C ₂	[333]
NiSi	<i>n</i>	600	10^{-5}		[330]
TiSi _x	$n = 5 \cdot 10^{19}$	900–1100	$(4–7) \cdot 10^{-6}$		[332]
Re	$n = 1.28 \cdot 10^{18}$	1000	$7 \cdot 10^{-5}$		[329]
W/WC/TaC	<i>n</i>	1000			[331]
Al/Ti	<i>p</i>	1000	$2 \cdot 10^{-4}$		[336]
Al/Ti	<i>p</i>	1000			[335]
Pt, W	<i>p</i>	Без отжига	$2.8 \cdot 10^{-4}$		[338]
W/Ti, Al/Ti	<i>p</i>				[337]
TiN	<i>p</i>		$4.4 \cdot 10^{-5}$		[339]

могут создаваться выбором металлов с работой выхода электронов Φ_m , меньшей, чем сродство к электрону полупроводника X_s для полупроводников *n*-типа ($\Phi_m < X_s$), или выбором металлов с работой выхода электронов Φ_m , большей, чем сумма ширины запрещенной зоны E_g

и сродства к электрону полупроводника X_s для полупроводников *p*-типа ($\Phi_m > E_g + X_s$). Если такие металлы существуют, то изготовление омического контакта сводится к удалению приповерхностного нарушенного или окисного слоя (например, Ti/Pt/Au–*n*-ZnSe). Если

же таких металлов нет, то изготовление контактов сводится к созданию между металлом и полупроводником соединения с низкой работой выхода (например, Si/Ti—*n*-GaN с образованием оксида титана в процессе термообработки).

2) Полупроводники с высокой плотностью поверхностных состояний, расположенных в глубине запрещенной зоны (например, Si, Ge, GaAs, GaP, InP).

В этих материалах уровень Ферми на поверхности полупроводника закреплен и величина работы выхода электронов из контактирующего металла слабо влияет на свойства контакта.

Изготовление омического контакта к таким полупроводникам сводится либо к сильному легированию приповерхностной области, что обеспечивает туннельное прохождение границы раздела электронами (например, в контакте Ni/Au+Ge/Ni/Au—*n*-GaAs уровень легирования GaAs германием достигает 10^{21} см^{-3}); либо к созданию в приповерхностной области химических соединений, существенно снижающих высоту потенциального барьера металл–полупроводник, что дает возможность электронам переходить границу за счет термоэлектронной эмиссии (например, In-GaAs); либо к пассивации поверхности полупроводника, что приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний (например, обработка поверхности GaAs в $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на порядок).

5.2. Несплавные омические контакты (тонкопленочные, контакты, создаваемые при низких температурах) можно рассматривать как барьеры Шоттки с низким или узким потенциальным барьером. Поэтому механизмы протекания тока являются характерными для диодов Шоттки:

1) термоэлектронная эмиссия (сопротивление контакта экспоненциально уменьшается с ростом температуры и высоты потенциального барьера металл–полупроводник);

2) полевая эмиссия, туннелирование (сопротивление контакта экспоненциально уменьшается с ростом уровня легирования и практически не зависит от температуры);

3) термополевая эмиссия (сопротивление контакта уменьшается с ростом температуры, но существенно слабее, чем в случае термоэлектронной эмиссии).

Термоэлектронная эмиссия проявляется в контактах на основе слабо легированных *n*- и *p*-GaAs, *n*-GaN, *p*-InP, *p*-In_{0.53}Ga_{0.47}Al, в которых в приконтактной области был изменен химический состав. Этот механизм идентифицировался на основании экспоненциального убывания сопротивления контакта с ростом температуры. Определенная из сравнения теории и эксперимента высота потенциального барьера металл–полупроводник составила 0.068–0.09 эВ для GaAs, 0.13 эВ для GaN, менее 0.2 эВ для InN, 0.13 эВ для InGaAs. Эти значения существенно меньше, чем высота потенциального барьера Шоттки на границе металл–полупроводник или высота потенциального барьера на свободной поверхности полупроводника.

Туннелирование (полевая эмиссия) проявляется в структурах на основе GaAs, InP, GaN, AlGaN, SiC, в которых приповерхностная область подвергалась сильному легированию. Этот механизм идентифицировался на основании независимости сопротивления контакта от температуры и экспоненциального убывания сопротивления контакта от концентрации носителей заряда. Уровень легирования в приконтактной области достигал 10^{20} – 10^{21} см^{-3} , что приводило к значительному сужению потенциального барьера металл–полупроводник. Высота потенциального барьера при этом была достаточно высокой: 0.3–0.5 эВ для *p*-GaAs, ~ 0.5 эВ для GaN, ~ 0.4 эВ для SiC-структур. При этом сопротивление контактов было достаточно низким из-за малой ширины потенциального барьера.

5.3. Для сплавных омических контактов (особенно для случая полупроводников с большой плотностью несовершенств) может проявляться еще один механизм, не характерный для диодов Шоттки, — протекание тока по металлическим шунтам. На основании экспериментальных данных по возрастанию сопротивления омических контактов от температуры этот механизм был подтвержден для In-контактов к слабо легированным GaP и GaN. Определенное из температурной зависимости сопротивления контакта количество шунтов на единицу площади контакта хорошо коррелировало с величиной плотности дислокаций в приповерхностной области полупроводника (для GaN количество шунтов составило 10^7 – 10^8 см^{-2} ; для GaP — $(4.5\text{--}8) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$). В то же время при низкой плотности дислокаций (например, для GaAs) этот механизм становится несущественным, и проявляются другие (традиционные) механизмы.

Авторы благодарны проф. О.В. Константинову за обсуждение данной работы.

Список литературы

- [1] W. Schottky. Z. Phys., **B118** (9/10), 539 (1942).
- [2] J. Bardeen. Phys. Rev., **71** (10), 717 (1947).
- [3] W.E. Spicer, I. Lindau, P. Skeath, C.Y. Si. J. Vac. Sci. Technol., **17**, 1019 (1980).
- [4] A.K. Henish. *Rectifying semiconductor contacts* (Clarendon Press, Oxford, 1957).
- [5] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы. Теория и эксперимент* (М., Энергоатом, 1987).
- [6] Ю.А. Гольдберг. ФТП, **28** (10), 1681 (1994).
- [7] R.H. Cox, H. Strack. Sol. St. Electron., **12**, 89 (1969).
- [8] G.K. Reeves. Sol. St. Electron., **23**, 477 (1980).
- [9] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник* (М., Радио и связь, 1975).
- [10] Э.Х. Родерик. *Контакты металл–полупроводник* (М., Радио и связь, 1982). [Пер. с англ.: E.H. Rhoderich. *Metal-Semiconductor Contacts* (Clarendon Press, Oxford, 1978)].
- [11] C.A. Mead. Sol. St. Electron., **9** (11/12), 1023 (1966).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984). [Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N. Y., Wiley, 1981)].

- [13] A. Peotrowska. *Thin Sol. Films*, **193/194**, 511 (1990).
- [14] K. Ip, G.T. Thaler, Hyucksoo Yang, Sang Youn Han, Yuanjie Li, D.P. Norton, S.J. Pearton Soowhan Jang, F. Ren. *J. Cryst. Growth*, **287** (1), 149 (2006).
- [15] W. Faschinger. *J. Cryst. Growth*, **197** (3), 557 (1999).
- [16] M. Murakami, Y. Koide. *Critic. Rev. Sol. St. and Mater. Sci.*, **23** (1), 1 (1998).
- [17] L.M. Porter, R.F. Davis. *Mater. Sci. Engin. B*, **34** (2–3), 83 (1995).
- [18] K. Das, V. Venkatesan, K. Miyata, D.L. Dreifus, J.T. Glass. *Thin Sol. Films*, **212** (1–2), 19 (1992).
- [19] Wu Dingfen, K. Heime. *Electron. Lett.*, **18**, 940 (1982).
- [20] Wu Dingfen, W. Dening, Kl. Heime. *Sol. St. Electron.*, **29**, 489 (1987).
- [21] R.K. Kupka, W.A. Anderson. *J. Appl. Phys.*, **69**, 3623 (1991).
- [22] F.A. Padovani, R. Stratton. *Sol. St. Electron.*, **9**, 695 (1966).
- [23] Y.-C. Shic, M. Murakami, W.H. Price. *J. Appl. Phys.*, **65**, 3539 (1989).
- [24] C.-F. Lin, D.B. Ingerly, Y.A. Chang. *Appl. Phys. Lett.*, **69** (23), 3543 (1996).
- [25] R.K. Kupka, W.A. Anderson. *J. Appl. Phys.*, **69**, 362 (1991).
- [26] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).
- [27] A.Y.C. Yu. *Sol. St. Electron.*, **13**, 239 (1970).
- [28] C.Y. Chang, Y.K. Fang, S.M. Sze. *Sol. St. Electron.*, **14**, 541 (1971).
- [29] S.M. Cho, J.D. Lee, H.H. Lee. *J. Appl. Phys.*, **70** (1), 282 (1991).
- [30] F.A. Padovani, R. Stratton. *Sol. St. Electron.*, **9**, 695 (1966).
- [31] Nien-Po Chen, H.J. Ueng, D.B. Janes, J.M. Woodall, M.R. Melloch. *J. Appl. Phys.*, **88** (1), 309 (2000).
- [32] D. Qiao, L.S. Yu, L. Jia, P.M. Asbeck, S.S. Lau, T.E. Haynes. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (6), 992 (2002).
- [33] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.Г. Никитин, Е.А. Поссе. *Письма ЖТФ*, **30** (19), 17 (2004).
- [34] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.Г. Никитин, Е.А. Поссе. *ФТП*, **40** (10), 52 (2006).
- [35] J. Narayan, P. Tiwari, X. Chen, J. Singh, R. Chowdhury, T. Zheleva. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (11), 1290 (1992).
- [36] E.J. Miller, D.M. Schaadt, E.T. Yu, X.L. Sun, L.J. Brillson, P. Waltereit, J.S. Speck. *J. Appl. Phys.*, **94** (12), 7611 (2003).
- [37] E.J. Miller, E.T. Yu, P. Waltereit, J.S. Speck. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (4), 535 (2004).
- [38] Chin-Yuan Hsu. *Jap. J. Appl. Phys.*, **44** (10), 7424 (2005).
- [39] L. Wang, F.M. Mohammad, J. Adeside. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (14), 14915 (2005).
- [40] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. *ФТП*, **20** (8), 1510 (1986).
- [41] Б.В. Царенков, Ю.А. Гольдберг, М.И. Ильина, Е.А. Поссе. *ФТП*, **22** (3), 555 (1988).
- [42] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе. *ЖТФ*, **71** (9), 61 (2001).
- [43] P. Visconti, K.M. Jones, M.A. Reshchikov, R. Cingolany, H. Morkoç, R.J. Molnar. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (22), 3532 (2000).
- [44] *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur (Singapore, World Scientific, 1996 (v. 1), 1999 (v. 2)).
- [45] *Properties of Advanced Semiconductor Materials*, ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur (N.Y., John Wiley and Sons, 2001).
- [46] J.D. Guo, M.S. Feng, R.J. Guo, F.M. Pan, C.Y. Chang. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (18), 2657 (1995).
- [47] А.Н. Андреев, А.А. Лебедев, М.Г. Растегаева, Ф.М. Снегов, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков, Л.Н. Шестопалова. *ФТП*, **29**, 1833 (1995).
- [48] M. Sawada, T. Sawada, Y. Yanagata, K. Imai, H. Kimura, M. Yoshino, K. Lizuka, H. Tomozawa. *Proc. Second Int. Conf. Nitride Sem.* (Tokushino, Japan, 1997) p. 706.
- [49] В.Ю. Денисов, А.А. Ключихин. *ФТП*, **38** (8), 897 (2004).
- [50] Lu-Min Liu, Gr. Lindauer, W. Brock Alexander, Paul H. Holloway. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13** (6), 2236 (1995).
- [51] J.J. Fijol, J.T. Trexier, L. Calhoun, R.M. Park, P.H. Holloway. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14** (1), 159 (1996).
- [52] T. Miyajima, H. Okuyama, K. Akimoto. *Jap. J. Appl. Phys.*, **31** (12B), L1743 (1992).
- [53] K. Akimoto, T. Miyajima, H. Okuyama, Y. Mori. *J. Cryst. Growth*, **115** (1–4), 683 (1991).
- [54] Y.X. Wang, P.H. Holloway. *Vacuum*, **43** (11), 1149 (1992).
- [55] M.R. Park, W.A. Anderson, M. Jeon, H. Luo. *Sol. St. Electron.*, **43** (1), 113 (1999).
- [56] R.G. Dandrea, C.B. Duke. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (16), 2145 (1994).
- [57] P.M. Mensz. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (16), 2148 (1994).
- [58] F. Vigué, P. Brunet, P. Lorenzini, E. Tournié, J.P. Faurie. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (21), 3345 (1999).
- [59] R. Schwarz, Th. Studnitzky, Fr. Goesmann, R. Schmid-Fetzer. *Sol. St. Electron.*, **42** (1), 139 (1998).
- [60] S. Einfeldt, H. Heinke, M. Behringer, C.R. Becker, E. Kurtz, D. Hommel, G. Landwehr. *J. Cryst. Growth*, **138** (1–4), 471 (1994).
- [61] Y. Lansari, J. Ren, B. Sneed, K.A. Bowers, J.W. Cook, jr., J.F. Schetzina. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (21), 2554 (1992).
- [62] F. Hiei, M. Ikeda, M. Ozawa, T. Miyajima, A. Ishibashi, K. Alimoto. *Electron Lett.*, **29** (10), 878 (1993).
- [63] K. Akimoto, T. Miyajima, H. Okuyama, Y. Mori. *J. Cryst. Growth*, **115** (1–4), 683 (1991).
- [64] J.J. Chen, T.J. Anderson, S. Jang, F. Ren, Y.J. Li, H.-S. Kim, B.P. Gila, D.P. Norton, S.J. Pearton. *J. Electrochem. Soc.*, **153** (5), G462 (2006).
- [65] B. Ghosh, N.K. Mondal, P. Banerjee, J. Pal, S. Das. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **49** (12), 2352 (2002).
- [66] Z. Yang, J.F. Schetzina. *J. Electron Mater.*, **23** (10), 1071 (1994).
- [67] S. Miller, P.H. Holloway. *J. Electron. Mater.*, **25** (11), 1709 (1996).
- [68] J. Rennie, M. Onomura, S. Nunoue, G. Hatakishi, H. Sugawara, M. Ishikawa. *Proc. Second Int. Conf. Nitride Sem.* (Tokushino, Japan, 1997) p. 711.
- [69] D.-W. Kim, H.K. Baik. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (7), 1011 (2000).
- [70] H. Morkoç, S. Strike, G.B. Gao, M.E. Lin, B. Sverdlov, M. Burns. *J. Appl. Phys.*, **76** (3), 1363 (1994).
- [71] M.E. Lin, Z. Ma, F.Y. Huang, Z.F. Fan, L.H. Allen, H. Morkoç. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (8), 1003 (1994).
- [72] S. Prakash, L.S. Tan, K.M. Ng, A. Raman, S.J. Chua, A.T.C. Woe, S.N. Lin. *Abstract of Int. Conf. on SiC and Rel. Mater.* (Sheraton, 1999) p. 48.
- [73] T. Gessmann, Y.L. Li, E.L. Waldron, J.W. Graff, E.F. Schubert, J.K. Sheu. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2), 986 (2002).
- [74] P.H. Holloway, T.J. Kim, J.T. Trexler, S. Miller, J.J. Fijot, W.U. Lampert, T.W. Haas. *Appl. Surf. Sci.*, **117/118**, 362 (1997).

- [75] C.R. Abernathy, J.D. Mac Kenzie, S.J. Pearton, W.S. Hobson. *Appl. Phys. Lett.*, **66** (15), 1969 (1995).
- [76] H.W. Jang, W. Urbanek, M.C. Yoo, J.-L. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **80** (5), 2937 (2002).
- [77] H. Morkoç, S. Strike, G.B. Gao, M.E. Lin, B. Sverdlov, M. Burns. *J. Appl. Phys.*, **76** (3), 1363 (1994).
- [78] S. Prakashs, L.S. Tan, K.M. Ng, A. Raman, S.J. Chua, A.T.C. Woe, S.N. Lin. *Abstract of Int. Conf. on SiC and Rel. Mater.* (Sheraton, 1999) p. 48.
- [79] J.K. Kim, J.H. Je, J.-L. Lee, Yo.Jo. Park, B.-T. Lee. *J. Electrochem. Soc.*, **148** (12), 4645 (2000).
- [80] Z. Fan, S.N. Mohammad, W. Kim, Ö. Aktas, A.E. Botchkarev, H. Morkoç. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (4), 1672 (1996).
- [81] C.-Y. Chang, T.-W. Lan, G.-C. Chi, L.-C. Chen, K.-H. Chen, J.-J. Chen, S. Jang, F. Ren, S.J. Pearton. *Electrochem. Sol. St. Lett.*, **9** (5), G155 (2006).
- [82] R. Khanna, S.J. Pearton, F. Ren, I. Kravchenko, C.J. Kao, G.C. Chi. *Appl. Surf. Sci.*, **252** (5), 1826 (2005).
- [83] D.-W. Kim, J.C. Bae, W.J. Kim, H.K. Baik, C.Y. Kym, Y. Ho Choi, C.-K. Kim, T.-K. Yoo, C.H. Hong, S.-M. Lee. *J. Electron. Mater.*, **30** (7), 855 (2001).
- [84] D.-W. Kim, H.K. Baik. *J. Appl. Phys.*, **77** (7), 1011 (2000).
- [85] M.L. Schuette, Wo Lu. *J. Vac. Sci. Technol.*, **23** (6), 3143 (2005).
- [86] J.K. Sheu, Y.K. Su, G.C. Chi, M.J. Jou, C.C. Liu, C.M. Chang. *Sol. St. Electron.*, **43** (11), 2081 (1999).
- [87] J.-L. Lee, J.K. Kim. *J. Electrochem. Soc.*, **147** (6), 2297 (2000).
- [88] J.-S. Jang, C.-W. Lee, S.-J. Park, T.-Y. Seong, I.T. Ferguson. *J. Electron. Mater.*, **31** (9), 903 (2002).
- [89] Lunev, V. Chaturvedi, A. Chitmis, G. Simin, J. Yang, M.A. Khan. *Abstract of Int. Conf. on SiC and Rel. Mater.* (Sheraton, 1999) p. 159.
- [90] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (16), 2588 (2001).
- [91] L.S. Yu, L. Jia, D. Qiao, S.S. Lau, J. Li, J.Y. Lin, H.X. Jiang. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **50** (2), 292 (2003).
- [92] Th. Gessmann, Y.-L. Li, E.L. Waldron, J.W. Graff, E.F. Schubert, J.K. Sheu. *J. Electron. Mater.*, **31** (5), 416 (2002).
- [93] D.B. Ingerly, Y.A. Chang, Y. Chen. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **4S1**(G6), 49 (1999).
- [94] J.S. Jang, H.G. Kim, K.H. Park, C.S. Um, I.K. Han, H.K. Jang, S.J. Part. *Mater. Res. Symp. Proc.*, **482**, 1653 (1998).
- [95] J.-K. Ho, C.-S. Jong, C.C. Chiu, C.-N. Huang, C.-Y. Chen, K.-K. Shih. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (2), 1275 (1999).
- [96] D.B. Ingerly, Y.A. Chang, Y. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (4), 2480 (1999).
- [97] L.-C. Chen, F.-R. Chen, J.-J. Kai, Li Chang, J.-K. Ho, C.-S. Jong, C.C. Chiu, C.-N. Huang, C.-Y. Chen, K.-K. Shih. *J. Appl. Phys.*, **86** (7), 3826 (1999).
- [98] J.-K. Ho, C.-S. Jong, C.C. Chiu, C.-N. Huang, K.-K. Shih, L.-C. Chen, R.-R. Chen, J.-J. Kai. *J. Appl. Phys.*, **86** (8), 4481 (1999).
- [99] K.-M. Chang, J.-Y. Chu, C.-C. Cheng. *Sol. St. Electron.*, **49** (8), 1381 (2005).
- [100] J.-S. Jang, S.J. Park, T.-Y. Seong. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (5), 2898 (2000).
- [101] M. Suzuki, T. Arai, T. Kawakami, S. Kobayashi, S. Fujita, Y. Koide, Y. Taga, M. Murakami. *J. Appl. Phys.*, **86** (9), 5079 (1999).
- [102] R.W. Chuang, A.Q. Zou, H.P. Lee. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **4S1**(G6), 42 (1999).
- [103] C.-F. Chu, C.C. Yu, Y.K. Wang, J.Y. Tsai, F.I. Lai, S.C. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (21), 3423 (2000).
- [104] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi. *Phys. Status Solidi A*, **188** (1), 363 (2001).
- [105] J.-O. Song, J.S. Kwak, T.-Y. Seong. *Semicond. Sci. Technol.*, **21** (2), L7 (2006).
- [106] J.D. Guo, C.I. Lin, M.S. Feng, F.M. Pan, G.C. Chi, T.C. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (2), 235 (1996).
- [107] C. Lu, H. Chen, X. Lv, X. Xie, S.N. Mohammad. *J. Appl. Phys.*, **91** (11), 9218 (2002).
- [108] S.N. Mohammad. *J. Appl. Phys.*, **95** (12), 7940 (2004).
- [109] K. Suzue, S.N. Mohammad, Z.F. Fan, W. Kim, O. Aktas, A.E. Botchkarev, H. Morkoç. *J. Appl. Phys.*, **80** (8), 4467 (1996).
- [110] J.-S. Jang, T.-Y. Seong. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (19), 2743 (2000).
- [111] A. Katz, S. Nakahara, W. Savin, B.E. Weir. *J. Appl. Phys.*, **68** (8), 4133 (1990).
- [112] J.S. Kwak, O.-H. Nam, Y. Park. *J. Appl. Phys.*, **95** (10), 5917 (2004).
- [113] J. Yun, K. Choi. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **27** (1), 22 (2006).
- [114] D. Qiao, Z.F. Guan, J. Carlton, S.S. Lau, G.J. Sullivan. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (18), 2652 (1999).
- [115] М.К. Гусейнов. *ЖТФ*, **22** (12), 75 (1996).
- [116] H.-Y. Cha, X. Chen, H. Wu, W.J. Schaff, M.G. Spencer, L.F. Eastman. *J. Electron. Mater.*, **35** (3), 406 (2006).
- [117] F.M. Mohammed, I. Adesida. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (14), 141915 (2005).
- [118] C.H. Kuo, J.K. Sheu, G.C. Chi, Y.L. Hyang, T.W. Yeh. *Sol. St. Electron.*, **45** (5), 717 (2001).
- [119] Y.-L. Li, E.F. Schubert, J.W. Graff, A. Osinsky, W.F. Schaff. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (19), 2728 (2000).
- [120] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.В. Калинина, О.В. Константинов, А.Е. Николаев, А.В. Фомин, А.Е. Черенков. *ФТП*, **35** (5), 550 (2001).
- [121] Ю.А. Гольдберг, Т.В. Львова, Р.В. Хасимова, Б.В. Царенков. *ФТП*, **22** (9), 1712 (1988).
- [122] F. Ren, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, P.W. Wisk. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (12), 1508 (1994).
- [123] C.R. Abernathy, S.J. Pearton, F. Ren, P.W. Wisk. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **11** (2), 179 (1993).
- [124] H.-K. Kim, J.-S. Jang, S.-J. Park, T.-Y. Seong. *J. Electron. Sol.*, **147** (4), 1573 (2000).
- [125] F. Ren. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15** (3), 802 (1997).
- [126] C.B. Vartuli, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.D. Mac Kenzie, M.L. Lovejoy, R.J. Shul, J.C. Zolper, A.G. Baca, M. Hagerott-Crawford, A. Jones, F. Ren. *Sol. St. Electron.*, **41** (4), 531 (1997).
- [127] C.B. Vartuli, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.D. Mac Kenzie, R.J. Shul, J.C. Zolper, M.L. Lovejoy, A.G. Baca, M. Hagerott-Crawford. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14** (6), 3520 (1996).
- [128] M.S. Carpenter, M.R. Melloch, M.S. Lundstrom, S.P. Tobin. *Appl. Phys. Lett.*, **52** (25), 2157 (1988).
- [129] M.S. Carpenter, M.R. Melloch, T.E. Dungan. *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1), 66 (1988).
- [130] Y. Nannichi, J.-F. Fan, H. Oigawa, A. Koma. *Jap. J. Appl. Phys.*, **27**, L2367 (1988).

- [131] J.-F. Fan, H. Oigawa, Y. Nannichi. *Jap. J. Appl. Phys.*, **27**, L2125 (1988).
- [132] S. Logha, D.B. Janes, N.P. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (23), 4452 (2002).
- [133] C.-T. Lee, Y.-J. Lin, D.-S. Liu. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (16), 2573 (2001).
- [134] J.O. Song, S.-J. Park, T.-Y. Seong. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (17), 3129 (2002).
- [135] G.Y. Chung, C.C. Tin, J.R. Williams, K. McDonalds, R. Charmane. *Abstract of E-MRS Spring Meeting, Symp. F: Amorph. Cryst. SiC Mater. Appl.* (2001) F7.
- [136] J. Massies, J. Chaplart, M. Lavirou, N.T. Linh. *Appl. Phys. Lett.*, **38** (9), 693 (1988).
- [137] T.J. Kim, P.H. Holloway, E.A. Kenik. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (26), 3835 (1997).
- [138] Y.-C. Shih, M. Murakami, E.L. Wilkie, A.C. Callegari. *J. Appl. Phys.*, **62** (2), 582 (1987).
- [139] M. Otsudo, H. Kumabe, H. Miki. *Sol. St. Electron.*, **20** (7), 617 (1977).
- [140] A. Christou. *Sol. St. Electron.*, **22** (2), 141 (1979).
- [141] C.L. Chen, L.J. Mahoney, M.C. Finn, R.C. Brooks, A. Chu, J.G. Mavroides. *Appl. Phys. Lett.*, **48** (5), 535 (1986).
- [142] Ю.А. Гольдберг, Б.В. Царенков. *ФТП*, **3** (11), 1718 (1969).
- [143] H.J. Ueng, N.-P. Chen, D.B. Janes, K.J. Webb, D.T. McInturff, M.R. Melloch. *J. Appl. Phys.*, **90** (11), 5637 (2001).
- [144] N. Okamoto, T. Takahashi, H. Tanaka, M. Takikawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **37** (6A), 3248 (1998).
- [145] M.S. Islam, Patrick J. McNally, D.C. Cameron, P.A.F. Herbert. *J. Mater. Proc. Technol.*, **77**(1-3), 42 (1998).
- [146] J. Zhou, G. Xia, B. Li, W. Liu, B. Wu. *Jap. J. Appl. Phys.*, **42** (5A), 2609 (2003).
- [147] H.-C. Lin, S. Senenayake, K.-Y. Cheng, M. Hong, J.R. Kwo, B. Yang, J.P. Mannaerts. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **50** (4), 880 (2003).
- [148] J. Zhou, G. Xia, B. Li, W. Liu. *Appl. Phys. A*, **76** (6), 939 (2003).
- [149] J.-W. Lim, J.-K. Mun, S.-J. An, S. Nam, M.-H. Kwak, H. Kim, J.-J. Lee. *Jap. J. Appl. Phys.*, **39** (5A), 2546 (2000).
- [150] Y. Tsunoda, M. Murakami. *J. Electron. Mater.*, **31** (1), 76 (2002).
- [151] H.J. Ueng, N.-P. Chen, D.B. Janes, K.J. Webb, D.T. McInturff, M.R. Melloch. *J. Appl. Phys.*, **90** (11), 5637 (2001).
- [152] J.-W. Lim, J.-K. Mun, S. Nam, M.-H. Kwak, H. Kim, M.-K. Song, D.S. Ma. *J. Phys. D*, **33** (13), 1611 (2000).
- [153] M.S. Islam, Patrick J. McNally, A.H.M. Zahirul Alam, M.Q. Huda. *Sol. St. Electron.*, **44** (4), 655 (2000).
- [154] F.A. Amin, A.A. Rezazadeh, S.W. Bland. *Mater. Sci. Engin. B*, **66** (1-3), 194 (1999).
- [155] J.-W. Lim, J.-K. Mun, M.-H. Kwak, J.-J. Lee. *Sol. St. Electron.*, **43** (10), 1893 (1999).
- [156] N.E. Lumpkin, G.R. Lumpkin, M.G. Blackford. *J. Mater. Res.*, **14** (4), 1261 (1999).
- [157] N. Okamoto, T. Takahashi, H. Tanaka. *Appl. Phys. Lett.*, **73** (6), 794 (1998).
- [158] D.W. Davies, D.V. Morgan, H. Thomas. *Sem. Sci. Technol.*, **14** (7), 615 (1999).
- [159] J.-W. Lim, J.-K. Mun, J.-J. Lee. *Appl. Surf. Sci.*, **85** (1), 208 (1999).
- [160] J.S. Kwak, H.K. Baik, J.-L. Lee, C.G. Park, H. Kim, K.-S. Suh. *Thin Sol. Films*, **291**, 497 (1996).
- [161] J.S. Kwak, J.-L. Lee, H.K. Baik. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **19** (12), 481 (1998).
- [162] Y.G. Wang, D. Wang, D.G. Ivey. *J. Appl. Phys.*, **84** (3), 1310 (1998).
- [163] M.S. Islam, P.J. McNally. *Thin Sol. Films*, **320** (2), 253 (1998).
- [164] M.S. Islam, Patrick J. McNally, D.C. Cameron, P.A.F. Herbert. *J. Mater. Sci. Technol.*, **77** (1-3), 42 (1998).
- [165] M.S. Islam, Patrick J. McNally. *Microelectron. Engin.*, **40** (1), 35 (1998).
- [166] M.S. Islam, Patrick J. McNally, D.C. Cameron, P.A.F. Herbert. *Thin Sol. Films*, **291**, 417 (1996).
- [167] M.O. Aboelfotoh, S. Oktyabrsky, J. Narayan, J.M. Woodall. *J. Mater. Res.*, **12** (9), 2325 (1997).
- [168] T. Oku, M. Furumai, C.J. Uchibori, M. Murakami. *Thin Sol. Films*, **300** (1-2), 218 (1997).
- [169] D.G. Ivey, S. Eicher, S. Wingar, T.P. Lester. *J. Mater. Sci.*, **8** (2), 63 (1997).
- [170] C.J. Uchibori, Y. Ohtani, T. Oku, N. Ono, M. Murakami. *Appl. Surf. Sci.*, **117-118**, 347 (1997).
- [171] C.J. Uchibori, Y. Ohtani, T. Oku, N. Ono, M. Murakami. *J. Electron. Mater.*, **26** (4), 410 (1997).
- [172] D.Y. Chen, Y.A. Chang, D. Swenson. *J. Appl. Phys.*, **81** (1), 297 (1997).
- [173] T. Lee, N.-P. Chen, J. Liu, R.P. Andres, D.B. Janes, E.H. Chen, M.R. Melloch, J.M. Woodall, R. Reifengerger. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2), 212 (2000).
- [174] I.G. Akdogan, M.A. Parker. *Electrochem. Sol. St. Lett.*, **8** (5), G106 (2005).
- [175] C.-H. Wu, S.-M. Liao, K.-C. Chang. *Mat. Sci. Engin. B*, **117** (2), 205 (2005).
- [176] Y. Shiraiishi, H. Shimawali. *Compound Semicond.* — *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **166**, 301 (2000).
- [177] M.O. Aboelfotoh, M.A. Borek, J. Narayan. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (25), 3953 (1999).
- [178] M. Ogura, M. Murakami. *J. Electron. Mater.*, **27** (10), L64 (1998).
- [179] K.A. Jones, M.W. Cole, W.Y. Han, D.W. Eckart, K.P. Hilton, M.A. Crouch, B.H. Hughes. *J. Appl. Phys.*, **82** (4), 1723 (1997).
- [180] B.M. Henry, A.E. Staton-Bevan, V.K.M. Sharma, M.A. Crouch. *Appl. Surf. Sci.*, **108** (4), 485 (1997).
- [181] R.V. Ghita, C. Logofatu, C. Negrila, A.S. Manea, M. Cernea, M.F. Lazarescu. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **7** (2), 3033 (2005).
- [182] В. Казлаускене, В. Кажукаускас, Ю. Мишкинис, А. Петравичюс, Р. Пурас, С. Сакалаускас, Ю. Синюс, Ю. Вайткус, А. Жиндулис. *ФТП*, **38** (1), 78 (2004).
- [183] I.H. Kim. *Mater. Lett.*, **57** (19), 2769 (2003).
- [184] I.H. Kim. *Mater. Lett.*, **56** (5), 775 (2002).
- [185] J.-M. Lee, I.-H. Choi, S.H. Park, B.-G. Min, T.-W. Lee, M.P. Park, K.-H. Lee. *J. Korean Phys. Soc.*, **37** (1), 43 (2000).
- [186] I.-H. Kim, S.H. Park, J. Kim, J.-M. Lee, T.-W. Lee, M.P. Park. *Jap. J. Appl. Phys.*, **37** (3B), 1348 (1998).
- [187] S.H. Park, I.H. Kim, T.W. Lee, M.P. Park. *Compound Semicond. 1997* — *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **156**, 459 (1998).
- [188] S.H. Park, T.-W. Lee, J.M. Lee, B.-G. Min, M.-P. Park, J.Y. Kim, I.-H. Kim. *J. Korean Phys. Soc.*, **34** (Suppl. 3), S273 (1999).
- [189] I.-H. Kim, S.H. Park, T.-W. Lee, M.-P. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (13), 1854 (1997).

- [190] E. Nebauer, M. Mai, E. Richter, J. Würfl. *J. Electron Mater.*, **27** (12), 1372 (1998).
- [191] I.H. Kim, S.H. Park, T.W. Lee, M.P. Park, B.R. Ryum, K.E. Pyun, H.M. Park. *Compound Semicond. 1997* — Inst. Phys. Conf. Ser., **156**, 455 (1998).
- [192] D.G. Ivey, R. Zhang, Z. Abid, S. Eicher, T.P. Lester. *J. Mater. Sci.*, **8** (5), 281 (1997).
- [193] B. Luo, G. Dang, A.-P. Zhang, F. Ren, J. Lopata, S.N.G. Chu, W.S. Hobson, S.J. Pearton. *J. Electrochem. Soc.*, **148** (12), G676 (2001).
- [194] F. Ren, S.J. Pearton, W.S. Hobson, T.R. Fullowan, A.B. Emerson, D.M. Schleich. *Appl. Phys. Lett.*, **58** (11), 1158 (1991).
- [195] Y.-T. Kim, J.-L. Lee, J.K. Mun, H. Kim. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (18), 2656 (1997).
- [196] Y. Shiraishi, N. Furuhashi, A. Okamoto. *J. Appl. Phys.*, **76** (9), 5099 (1994).
- [197] S.V. Morozov, Yu.V. Dubrovskii, V.N. Abrosimova, J. Würfl. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (22), 2882 (1998).
- [198] J.W. Lim, J.K. Mun, M.H. Kwak, J.J. Lee. *Sol. St. Electron.*, **43** (10), 1893 (1999).
- [199] S. Oktyabrsky, M.O. Aboelfotouh, J. Narayan. *J. Electron. Mater.*, **25** (11), 1673 (1996).
- [200] H.S. Lee, M.W. Cole, R.T. Lareau, S.N. Schauer, D.C. Fox, D.W. Eckart, R.P. Moerkirk, W.H. Chang, K.A. Jones, S. Elagoz, W. Vavra, R. Clarke. *J. Appl. Phys.*, **72** (10), 4773 (1992).
- [201] R.V. Ghita, C. Logofatu, C. Negrila, A.S. Manea, M. Cernea, M.F. Lazarescu. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **7** (6), 3033 (2005).
- [202] С.Е. Александров, В.В. Волков, В.П. Иванова, Ю.С. Кузьмичев, Ю.В. Соловьев. *ЖТФ*, **31** (14), 1 (2005).
- [203] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.Г. Никитин, Е.А. Поссе. *ЖТФ*, **77** (2), 140 (2007).
- [204] T.J. Kim, P.H. Holloway. *Critic. Rev. Sol. St. Mater.*, **22** (3), 239 (1997).
- [205] Y. Shiraishi, N. Furuhashi, A. Okamoto. *J. Appl. Phys.*, **76** (9), 5099 (1994).
- [206] F. Radulescu, J.M. McCarthy. *J. Vac. Sci. Technol.*, **17** (5), 2294 (1999).
- [207] S.N.G. Chu, A. Katz, T. Boone, P.M. Thomas, V.G. Riggs, W.C. Dautremont-Smith, W.D. Johnston, jr. *J. Appl. Phys.*, **67** (8), 3754 (1990).
- [208] K.A. Jones, E.H. Linfield, J.E.F. Frost. *Appl. Phys. Lett.*, **69** (27), 4197 (1996).
- [209] H. Shimawaki, N. Furuhashi, K. Honjo. *J. Appl. Phys.*, **69** (11), 7939 (1991).
- [210] N.-P. Chen, H.J. Ueng, D.B. Janes, J.M. Woodall, M.R. Melloch. *J. Appl. Phys.*, **88** (1), 309 (2000).
- [211] C.J. Uchibori, T. Oku, N. Kameya, N. Ono, M. Murakami. *Mater. Transaction JIN*, **37** (4), 670 (1996).
- [212] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (М., Мир, 1979).
- [213] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. *ФТП*, **37** (9), 1022 (2003).
- [214] M.H. Park, L.C. Wang, D.C. Dufner, I.H. Tan, F. Kish. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **155**, 369 (1997).
- [215] M.-H. Park, L.C. Wang, D.C. Dufner, Fei Deng, S.S. Lau, I.H. Tan, F. Kish. *J. Appl. Phys.*, **81** (7), 3138 (1997).
- [216] L.C. Wang, Moon-Ho Park, H.A. Jorge, I.H. Tan, F. Kish. *Electron. Lett.*, **82** (4), 409 (1996).
- [217] F. Zhang, B. Li, B. Sang. *Mater. Sci. Engin. B*, **25** (1), 24 (1994).
- [218] F. Zhang, Z. Song, J. Peng. *Appl. Surf. Sci.*, **62** (1–2), 83 (1992).
- [219] Y. Koide, M. Murakami. *Electron. Cummunic. Jap.* (pt 2)—*Electron.*, **82** (10), 43 (1999).
- [220] L. Baojun, L. Enke, Z. Fujia. *Sol. St. Electron.*, **41** (6), 917 (1997).
- [221] M.V. Tagare, T.P. Chin, J.M. Woodall. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (24), 3485 (1996).
- [222] F. Ren, S.J. Pearton, J.R. Lothian, S.N.G. Chu, W.K. Chu, R.G. Wilson, C.R. Abernathy, S.S. Pei. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (17), 2165 (1994).
- [223] R. Dutta, M.A. Shahid, P.J. Sakach. *J. Appl. Phys.*, **69** (7), 3968 (1991).
- [224] J.S. Park, H.J. Park, Y.B. Hahn, G.-C. Yi, A. Yoshikawa. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21** (2), 795 (2003).
- [225] W.C. Huang. *Appl. Surf. Sci.*, **245**, 141 (2005).
- [226] T. Clausen, A.S. Pedersen, O. Leistiko. *Microelectron. Engin.*, **15** (1–4), 157 (1991).
- [227] R. Dutta, M.A. Shahid, P.J. Sakach. *J. Appl. Phys.*, **69** (7), 3968 (1991).
- [228] M.B. Takeyama, A. Noya, T. Hashizume, H. Hasegawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **65** (2B), 1115 (1999).
- [229] F. Ren, M.J. Antonell, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, J.R. LaRoche, M.W. Cole, J.R. Lothian, R.W. Gedridge, jr. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (13), 1845 (1999).
- [230] D.G. Ivey, D. Wang, D. Yang, R. Bruce, G. Knight. *J. Electron. Mater.*, **23** (5), 441 (1994).
- [231] P.A. Leigh, R.M. Cox, P.J. Dobson. *Sol. St. Electron.*, **37** (7), 1353 (1994).
- [232] W.C. Huang, T.F. Lei, C.L. Lee. *J. Appl. Phys.*, **79** (12), 9200 (1996).
- [233] P. Jian, D.G. Ivey, R. Bruce, G. Knight. *J. Electron. Mater.*, **23** (9), 953 (1994).
- [234] J. Morais, T.A. Fazan, R. Landers, E.A.S. Sato. *J. Appl. Phys.*, **79** (9), 7058 (1996).
- [235] W.-C. Huang, T.-F. Lei, C.-L. Lee. *J. Appl. Phys.*, **78** (10), 6108 (1995).
- [236] W.O. Barnard, G. Myburg, F.D. Auret, J.H. Potgieter, P. Ressel, E. Kuphal. *Vacuum*, **46** (8–10), 893 (1995).
- [237] D.G. Ivey, P. Jian, L. Wan, R. Bruce, S. Eicher, C. Blaauw. *J. Electron. Mater.*, **20** (3), 237 (1991).
- [238] S. Hwang, J. Shim. *J. Korean Phys. Soc.*, **46** (4), L751 (2005).
- [239] M.-H. Park, L.C. Wang, J.Y. Cheng, C.J. Palmstrøm. *Appl. Phys. Lett.*, **70** (1), 99 (1997).
- [240] A. Yamaguchi, T. Okada, Y. Iguchi, T. Saitoh, H. Asamizu, Y. Koide, M. Murakami. *Compound Semicond. 1997* — Inst. Phys. Conf. Ser., **162**, 162 (1999).
- [241] A. Yamaguchi, H. Asamizu, T. Okada, Y. Iguchi, T. Saitoh, Y. Koide, M. Murakami. *J. Appl. Phys.*, **85** (11), 7792 (1999).
- [242] A. Yamaguchi, I. Tonai, N. Yamabayashi, M. Shibata. *Bunseki Kagaku*, **40** (11), 741 (1991).
- [243] H. Asamizu, A. Yamaguchi, Y. Iguchi, T. Saitoh, M. Murakami. *Mater. Transactions*, **43** (6), 1352 (2002).
- [244] A. Yamaguchi, H. Asamizu, T. Okada, Y. Iguchi, T. Saitoh, Y. Koide, M. Murakami. *J. Vac. Sci. Technol.*, **18** (4), 1957 (2000).
- [245] N. Asamizu, A. Yamaguchi, Y. Iguchi, T. Saitoh, Y. Koide, M. Murakami. *Appl. Surf. Sci.*, **159**, 174 (2000).
- [246] V. Malina, L. Moro, V. Micheli, I. Mojzes. *Semicond. Sci. Technol.*, **11** (7), 1121 (1996).
- [247] M.H. Park, L.C. Wang, D.M. Hwang. *J. Electron. Mater.*, **25** (4), 721 (1996).

- [248] M.H. Park, L.C. Wang, J.Y. Cheng, Fei Deng, S.S. Lau, C.J. Palmström. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (7), 952 (1996).
- [249] W. Zhao, S. Kim, J. Zhang, I. Adesida. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **27** (1), 1 (2006).
- [250] S.-W. Chang, E.Y. Chang, S.-S. Lee, K.-S. Chen, S. W. Tseng, Y.-Y. Tu, C.-T. Lee. *Jap. J. Appl. Phys. Lett.*, **44** (28–32), L899 (2005).
- [251] Z. Tang, H. Hsia, H.C. Kuo, B. Moser, D. Caruth, G.E. Stillman, M. Feng. *Compound Semicond.* — *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **166**, 321 (2000).
- [252] J. Herniman, J.S. Yu, A.E. Staton-Bevan. *Appl. Surf. Sci.*, **52** (4), 289 (1991).
- [253] A. Katz, A. Feingold, S.J. Pearton. *Semicond. Sci. Technol.*, **7** (3), 436 (1992).
- [254] A. Katz, A. El-Roy, A. Feingold, M. Geva, N. Moriya, S.J. Pearton, E. Lane, T. Keel, C.R. Abernathy. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (21), 2652 (1993).
- [255] Y.-H. Yeh, J.-T. Lai, J. Ya-min Lee. *Jap. J. Appl. Phys. Lett.*, **35** (12A), L1569 (1996).
- [256] P.W. Leech, G.K. Reeves, M.H. Kibel. *J. Appl. Phys.*, **76** (8), 4713 (1994).
- [257] P. Jian, D.G. Ivey, R. Bruce, G. Knight. *J. Mater. Sci.*, **7** (2), 7 (1996).
- [258] T. Clausen, O. Leistiko. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (10), 1108 (1993).
- [259] T. Clausen, O.L. Chorkendorff, J. Larsen. *Thin Sol. Films*, **232** (2), 215 (1993).
- [260] А.Н. Именков, Е.А. Гребенщикова, Б.Е. Журганов, Т.Н. Данилова, М.А. Сиповская, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **38** (11), 1356 (2004).
- [261] K. Ikossi, M. Goldenberg, J. Mittereder. *Sol. St. Electron.*, **46** (10), 1627 (2002).
- [262] R.K. Huang, C.A. Wang, C.T. Harris, M.K. Connors, D.A. Shiau. *J. Electron. Mater.*, **33** (11), 1406 (2004).
- [263] C.A. Wang, D.A. Shiau, R.K. Huang, C.T. Harris, M.K. Connors. *J. Cryst. Growth*, **261** (2–3), 379 (2004).
- [264] J.A. Robinson, S.E. Mohny. *J. Appl. Phys.*, **98** (3), 033 703 (2005).
- [265] J. Sigmund, M. Saglam, A. Vogt, H.L. Hartnagel, V. Buschmann, T. Wieder, H. Fuess. *J. Cryst. Growth*, **227**, 625 (2001).
- [266] K. Varblianska, K. Tzenez, T. Kotsinov. *Phys. Status Solidi A*, **163** (2), 387 (1997).
- [267] A. Vogt, H.L. Hartnagel, G. Mische, H. Fuess, J. Schmitz. *J. Vacuum. Sci. Technol. B*, **14** (6), 3514 (1996).
- [268] E. Villemain, S. Gaillard, M. Rolland, A. Joullie. *Mater. Sci. Engin. B*, **20** (1–2), 162 (1993).
- [269] Y.K. Su, F.S. Juang, J.G. Kuang. *Jap. J. Appl. Phys.*, **30** (5), 914 (1991).
- [270] K.G. Merkel, C.L.A. Cerny, V.M. Bright, F.L. Schuermeyer, T.P. Monahan, R.T. Lareau, R. Kaspi, A.K. Rai. *Sol. St. Electron.*, **39** (2), 179 (1996).
- [271] A. Vogt, A. Simon, J. Weber, H.L. Hartnagel, J. Schikora, V. Buschmann, H. Fuess. *Mater. Sci. Engin. B*, **66** (1–3), 199 (1999).
- [272] A.G. Milnes, M. Ye, M. Stam. *Sol. St. Electron.*, **37** (1), 37 (1994).
- [273] C.-T. Lee, K.-L. Jaw, C.-D. Tsai. *Sol. St. Electron.*, **42** (5), 871 (1998).
- [274] Y. Zhao, M.J. Jurkovic, W.I. Wang. *J. Electrochem. Soc.*, **144** (3), 1067 (1997).
- [275] Y. Shiraishi, N. Furuhashi, A. Okamoto. *J. Appl. Phys.*, **76** (9), 5099 (1994).
- [276] V. Srivastav, R. Pal, B.L. Sharma, V. Mittal, V. Gopal, H.P. Vyas. *J. Electron. Mater.*, **34** (3), 225 (2005).
- [277] E.M. Lyaszek, S.E. Mohny, T.N. Wittberg. *Electron. Lett.*, **39** (25), 1866 (2003).
- [278] J.B. Boos, B.R. Bennett, W. Kruppa, D. Park, J. Mittereder, R. Bass, M.E. Twigg. *J. Vacuum. Sci. Technol.*, **17** (3), 1022 (1999).
- [279] T. Teraji, S. Koizumi, H. Kanda. *Phys. Status Solidi A*, **181** (1), 129 (2000).
- [280] Tokuyuki Terai, Masayuki Katagiri, Satoshi Koizumi, Toshimichi Ito, Hisao Kanda. *Jap. J. Appl. Phys. Lett.*, **42** (8A), L882 (2003).
- [281] Han Gao, Cheng Mu, Fan Wang, Dongsheng Xu, Kai Wu, Youchang Xie, Shuang Liu, Enge Wang, Jun Xu, Dapeng Yu. *J. Appl. Phys.*, **93** (9), 5602 (2003).
- [282] M. Werner, R. Job, A. Denisenko, A. Zaitsev, W.R. Fahrner, C. Johnston, P.R. Chalker, I.M. Buckley-Golder. *Diamond Relat. Mater.*, **5** (6–8), 723 (1996).
- [283] V. Venkatesan, K. Das. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **13** (2), 126 (1992).
- [284] V. Venkatesan, D.M. Malta, K. Das, A.M. Belu. *J. Appl. Phys.*, **74** (2), 1179 (1993).
- [285] T. Iwasaki, K. Okano, Y. Matsumae, E. Matsushima, H. Maekawa, H. Kiyota, T. Kurosu, M. Iida. *Diamond Relat. Mater.*, **3** (1–2), 30 (1994).
- [286] Y. Chen, M. Ogura, S. Yamasaki, H. Okushi. *Semicond. Sci. Technol.*, **20** (8), 860 (2005).
- [287] Y.G. Chen, M. Ogura, S. Yamasaki, H. Okushi. *Diamond Relat. Mater.*, **13** (11–12), 2121 (2004).
- [288] C. Zhen, Y. Wang, S. He, Q. Guo, Z. Yan, Y. Pu. *Optic Mater.*, **23** (1–2), 117 (2003).
- [289] C.M. Zhen, Y.Y. Wang, Q.F. Guo, M. Zhao, Z.W. He, Y.P. Guo. *Diamond. Relat. Mater.*, **11** (9), 1709 (2002).
- [290] Y.Y. Wang, C.M. Zhen, Z.J. Yan, Q.F. Guo, G.H. Chen. *Inter. J. Mod. Phys. B*, **16** (6–7), 927 (2002).
- [291] C. Zhen, X. Liu, Z. Yan, H. Gong, Y. Wang. *Surf. Interf. Sci.*, **32** (1), 106 (2001).
- [292] C.M. Zhen, X.Q. Liu, Z.J. Yan, H.X. Gong, Y.Y. Wang. *Chines. Phys. Lett.*, **17** (11), 827 (2000).
- [293] H.A. Hoff, G.L. Waytena, C.L. Vold, J.S. Suehle, I.P. Isaacson, M.L. Rebbert, D.I. Ma, K. Harris. *Diamond. Relat. Mater.*, **5** (12), 1450 (1996).
- [294] M. Werner, C. Johnston, P.R. Chalker, S. Romani, I.M. Buckley-Golder. *J. Appl. Phys.*, **79** (5), 2535 (1996).
- [295] K. Das, V. Venkatesan, T.P. Humphreys. *J. Appl. Phys.*, **76** (4), 2208 (1994).
- [296] J. Nakanishi, A. Otsuki, T. Oku, O. Ishiwata, M. Murakami. *J. Appl. Phys.*, **76** (4), 2293 (1994).
- [297] M. Werner, O. Dorsch, H.U. Baerwind, A. Ersoy, E. Obermeier, J. Johnston, S. Romani, P.R. Chalker, V. Moore, I.M. Buckley-Golder. *Diamond. Relat. Mater.*, **3** (4–6), 983 (1994).
- [298] Y.Y. Wang, C.M. Zhen, H.X. Gong, Z.J. Yan, Y.F. Wang, X.Q. Wang, Y.H. Yang, S.H. He. *Acta Phys. Sinica*, **49** (7), 1348 (2000).
- [299] J.R. Waldrop. *J. Appl. Phys.*, **75** (9), 4548 (1994).
- [300] E.V. Kalinina, G.F. Kholuyanov, A.V. Shchukarev, N.S. Savkina, A.I. Babanin, M.A. Yagovkina, N.I. Kuznetsov. *Diamond Relat. Mater.*, **8** (6), 1114 (1999).
- [301] M.W. Cole, P.C. Joshi, C. Hubbard, J.D. Demaree, M. Ervin. *J. Appl. Phys.*, **91** (6), 3864 (2002).
- [302] H. Na, H. Kim, K. Adachi, N. Kiritani, S. Tanimoto, H. Okushi, K. Arai. *J. Electron. Mater.*, **33** (2), 89 (2004).

- [303] T.V. Blank, Y.A. Goldberg, O.V. Konstantinov. Nucl. Instrum. Meth., **A509**, 109 (2003).
- [304] O.J. Guy, G. Pope, I. Blackwood, K.S. Teng, L. Chen, W.Y. Lee, S.P. Wilks, P.A. Mawby. Surf. Sci., **573** (2), 253 (2004).
- [305] O.J. Guy, G. Pope, I. Blackwood, K.S. Teng, W.Y. Lee, S.P. Wilks, P.A. Mawby. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2003* — Mater. Sci. Forum, **457–460**, 853 (2004).
- [306] G. Pope, O. Guy, P.A. Mawby. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2003* — Mater. Sci. Forum, **457–460**, 833 (2004).
- [307] S.J. Yang, C.K. Kim, I.H. Noh, S.W. Jang, K.H. Jung, N.I. Cho. *Diamond Relat. Mater.*, **13** (4–8), 1149 (2004).
- [308] Nam-Ihn Cho, Kyung-Hwa-Jung, Yong Choi. *Semicond. Sci. Technol.*, **19** (3), 306 (2004).
- [309] S.Y. Han, N.K. Kim, E.D. Kim, J.L. Lee. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2001* — Mater. Sci. Forum, **389–393**, 897 (2002).
- [310] L.G. Fursin, J.H. Zhao, M. Weiner. *Electron. Lett.*, **37** (17), 1092 (2001).
- [311] S. Liu, K. Reinhardt, C. Severt, J. Scofield. *Silicon Carb. Relat. Mater.*, 1995 — Inst. Phys. Conf. Ser., **142**, 589 (1996).
- [312] L. Kassamakova, R.D. Kakanakov, I.V. Kassamakov, N. Nordell, S. Savage, B. Hjorvarsson, E.B. Svedberg, L. Aborn, L.D. Madsen. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **46** (3), 605 (1999).
- [313] K. Vassilevski, K. Zekentes, G. Constantinidis, N. Papanicolaou, I. Nikitina, A. Babanin. *Silicon Carb. Relat. Mater. 1999* — Mater. Sci. Forum, **338–343**, 1017 (2000).
- [314] L. Kassamakova, R. Kakanakov, I. Kassamakov, N. Nordell, S. Savage, E.B. Svedberg, L.D. Madsen. *Silicon Carb. Relat. Mater. 1999* — Mater. Sci. Forum, **338–343**, 1009 (2000).
- [315] R. Kakanakov, L. Kassamakova, I. Kassamakov, K. Zekentes, N. Kuznetsov. *Mater. Sci. Engin. B*, **80** (1–3), 374 (2001).
- [316] K. Vassilevski, K. Zekentes, K. Tsagaraki, G. Constantinidis, I. Nikitina. *Mater. Sci. Engin. B*, **80** (1–3), 370 (2001).
- [317] L. Kassamakova, R. Kakanakov, I. Kassamakov, K. Zekentes, K. Tsagaraki, G. Atanasova. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2000* — Mater. Sci. Forum, **353–363**, 251 (2000).
- [318] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, А.О. Константинов, А. Халлен. *Письма ЖТФ*, **27** (18), 43 (2001).
- [319] O. Nakatsuka, T. Takei, Ya. Koide, M. Murakami. *Mater. Transaction*, **43** (7), 1984 (2002).
- [320] S. Tsukimoto, T. Sakai, T. Onishi, K. Ito, M. Murakami. *J. Electron. Mater.*, **34** (10), 1310 (2005).
- [321] S. Tsukimoto, T. Sakai, M. Murakami. *J. Appl. Phys.*, **96** (9), 4976 (2004).
- [322] R. Kakanakov, L. Kazamakova-Kolaklieva, N. Hristeva, G. Lepoeva, J.B. Gomes, I. Avramova, T. Marinova. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2003* — Mater. Sci. Forum, **457–460**, 877 (2004).
- [323] S. Tsukimoto, K. Nitta, T. Sakai, M. Moriyama, M. Murakami. *J. Electron. Mater.*, **33** (5), 460 (2004).
- [324] T. Sakai, K. Nitta, S. Tsukimoto, M. Moriyama, M. Murakami. *J. Appl. Phys.* **95** (4), 2187 (2004).
- [325] R. Kakanakov, L. Kassamakova, N. Hristeva, G. Lepoeva, N. Kuznetsov, K. Zekentes. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2001* — Mater. Sci. Forum, **389–393**, 917 (2002).
- [326] L. Kassamakova, R. Kakanakov, N. Nordell, S. Savage, A. Kakanakova-Georgieva, T. Marinova. *Mater. Sci. Engin. B*, **61–62**, 291 (1999).
- [327] K.V. Vassilevski, G. Constantinidis, N. Papanicolaou, N. Martin, K. Zekentes. *Mater. Sci. Engin. B*, **61–62**, 296 (1999).
- [328] N.A. Papanicolaou, A. Edwards, M.V. Rao, W.T. Anderson. *Appl. Phys. Lett.*, **73** (14), 2009 (1998).
- [329] G.Y. McDaniel, S.T. Fenstermaker, W.V. Lampert, P.H. Holloway. *J. Appl. Phys.*, **96** (9), 5357 (2004).
- [330] C. Deeb, A.H. Heuer. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (7), 1117 (2004).
- [331] T. Jang, B. Odekirk, L.D. Madsen, L.M. Porter. *J. Appl. Phys.*, **90** (9), 4555 (2001).
- [332] U. Schmid, R. Getto, S.T. Sheppard, W. Wondrak. *J. Appl. Phys.*, **85** (5), 2681 (1999).
- [333] S. Liu, K. Reinhardt, C. Severt, J. Scofield. *Silicon Carb. Relat. Mater. 1995* — Inst. Phys. Conf. Ser., **142**, 589 (1996).
- [334] A. Scorzoni, F. Moscatelli, A. Poggi, G.C. Cardinali, R. Nipoti. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2004* — Mater. Sci. Forum, **457–460**, 881 (2004).
- [335] F. Moscatelli, A. Scorzoni, A. Poggi, G.C. Cardinali, R. Nipoti. *Silicon Carb. Relat. Mater. 2002* — Mater. Sci. Forum, **433–4**, 673 (2002).
- [336] F. Moscatelli, A. Scorzoni, A. Poggi, G.C. Cardinali, R. Nipoti. *Semicond. Sci. Technol.*, **18** (6), 554 (2003).
- [337] K. Nakashima, O. Eryo, O. Kais, V. Yoshida, M. Watanabe. *Silicon Carb. Relat. Mater. 1999* — Mater. Sci. Forum, **338** (3), 1005 (2000).
- [338] A.A. Iliadis, S.N. Andronescu, W. Yang, R.D. Vispute, A. Stanishevsky, J.H. Orloff, R.P. Sharma, T. Venkatesan, M.C. Wood, K.A. Jones. *J. Electron. Mater.*, **28** (3), 136 (1999).
- [339] A.A. Iliadis, S.N. Andronescu, K. Edinger, J.H. Orloff, R.D. Vispute, V. Talyansky, R.P. Sharma, T. Venkatesan, M.C. Wood, K.A. Jones. *Appl. Phys. Lett.*, **73** (24), 3545 (1998).
- [340] J. Crofton, P.A. Barnes, J.R. Williams, J.A. Edmond. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (4), 384 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

The current flow mechanism in metal–semiconductor ohmic contacts

T.V. Blank, Yu.A. Goldberg

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The review on properties of metal–semiconductor ohmic contacts and current flow mechanisms (thermionic emission, field emission, thermofield emission and current flow by metallic shunts) is presented completed. The theoretical temperature and concentration dependencies of ohmic contact resistance have been compared with experimental data for ohmic contacts to semiconductors $A^{II}B^{VI}$ (ZnSe, ZnO), $A^{III}B^{V}$ (GaN, AlN, InN, GaAs, GaP, InP), A^{IV} (SiC, diamond) and semiconductor solid solutions. In ohmic contacts metal–(weakly doped semiconductor) the main current flow mechanism is thermionic emission, and the barrier height was near 0.1–0.2 eV. In ohmic contacts metal–(highly doped semiconductor) the main current flow mechanism is field emission, and the barrier height was near 0.3–0.5 eV. In alloyed ohmic contacts In–GaP, In–GaN the current flows along metallic shunts which formed by metallic atom deposition on semiconductor dislocations or other imperfections.